



Universidad  
Carlos III de Madrid

TRABAJO FIN DE GRADO

# FUSIÓN SENSORIAL PARA DETECCIÓN DE ADELANTAMIENTOS DE VEHÍCULOS

Autor: José Manuel Beato Fuentes

Tutor: Fernando García Fernández

Leganés, diciembre de 2012



Título: FUSIÓN SENSORIAL PARA DETECCIÓN DE ADELANTAMIENTOS  
DE VEHÍCULOS

Autor: JOSÉ MANUEL BEATO FUENTES

Tutor: FERNANDO GARCÍA FERNÁNDEZ

## EL TRIBUNAL

Presidente: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Secretario: \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día \_\_\_\_ de Septiembre de 2012 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



# Agradecimientos

A mis padres, que me han dado la oportunidad de llegar hasta aquí, trabajando cada día para que yo pudiera estudiar, y teniendo la paciencia necesaria para esperar al día de hoy, a pesar de las dificultades que hemos pasado en casa.

A mi hermana, que tanto me ha ayudado a lo largo de mi vida de estudiante.

A mis amigos, que me han apoyado siempre, en tantos momentos difíciles como he pasado, y han tenido la comprensión para entender que si no he pasado más tiempo con ellos no ha sido porque no haya querido, sino por no haber podido.



# Resumen

En el presente proyecto, se pretende construir un sistema de fusión sensorial, que permita determinar cuándo un coche está siendo adelantado. Para ello, se utilizan dos algoritmos: el algoritmo de Lucas y Kanade de forma piramidal para determinar la cantidad, dirección y sentido del movimiento, y el algoritmo de Haar-like en cascada, para determinar la presencia o no de coche.

Como herramientas, se dispone del IVVI 2.0, el vehículo inteligente basado en información visual, desarrollado por el Laboratorio de Sistemas Inteligentes de la Universidad Carlos III. Dicho vehículo está equipado con una cámara de vídeo en la parte delantera, que captura en tiempo real una panorámica de la vía por la que se circula, un ordenador en el maletero, que analiza las imágenes captadas por la cámara, y una pantalla en el salpicadero, que muestra las imágenes capturadas por la cámara y la información analizada por el ordenador.

El objetivo del proyecto es reducir los accidentes de tráfico por salida de vía y colisión lateral, que causan la mayor parte de las muertes en carretera en España, además de proporcionar a las compañías automovilísticas un valor añadido a su producto, y servir de base en investigaciones futuras sobre sistemas inteligentes de ayuda a la conducción (ADAS).

**Palabras clave:** fusión sensorial, movimiento, vehículo inteligente, sistemas inteligentes de ayuda a la conducción.





# Abstract

In this project, a sensory fusion system is expected to be built. It should detect when a car is overtaking the test vehicle. This is done by using two algorithms, the pyramidal Lucas and Kanade algorithm, to determine the quantity and direction of the movement, and the Haar-like cascade algorithm, to determine the presence or not of a car. The fusion of the information of both algorithms is a key-point for provide a trustable and reliable road safety application.

The project was developed in the frame of the project IVVI 2.0 (Intelligent Vehicle based on Visual Information), an intelligent vehicle developed by the Intelligent Systems Laboratory (LSI) of the University Carlos III of Madrid. This vehicle is equipped with different devices that intend to use the latest advances in computer vision and other sensing technologies to help and warn drivers in case of hazardous situations. Among the different devices available, the used for the present project was a stereo-camera mounted in the windshield, connected to one of the several computers located in the trunk of the vehicle. The information provided by the computer is displayed in a monitor situated in the dashboard.

The objective of the project is to reduce the traffic accidents produced by road departures and side collisions, which cause the majority road deaths in Spain. Besides it can be used in further automotive applications and researches on intelligent systems for Advanced Driving Assistant System (ADAS).

**Keywords:** sensory fusion, movement, intelligent vehicle, ADAS.



# Índice general

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>18</b> |
| 1.1 Objetivos del trabajo .....  | 23        |
| 1.2 Estructura de la memoria .....   | 24        |
| <b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>  | <b>26</b> |
| 2.1 Sistema antibloqueo de frenos (ABS) .....  | 27        |
| 2.2 Control electrónico de estabilidad (ESP).....                                    | 29        |
| 2.3 Sistema electrónico de asistencia a la frenada de emergencia (BAS).....          | 31        |
| 2.4 Sistema de reparto electrónico de frenada (EBD) .....                            | 34        |
| 2.5 Sistema de control de tracción (ASR) .....                                       | 35        |
| 2.6 Sistema de control de velocidad de cruce adaptativo (ACC).....                   | 36        |
| 2.7 Limitador de velocidad .....   | 38        |
| 2.8 Sistema de detección de ángulos muertos y asistencia para cambio de carril ..... | 39        |
| 2.9 Sistema de alerta de cambio involuntario de carril (LDW).....                    | 41        |
| 2.10 Sistema de visión nocturna .....  | 42        |
| 2.11 Sistema de aviso de obstáculos o colisión .....                                 | 44        |
| 2.12 Sistema de protección de peatones y usuarios vulnerables de la vía pública..... | 44        |
| 2.13 Sistema de reconocimiento de señales de tráfico .....                           | 45        |
| 2.14 Sistemas de control y alerta antisueño.....                                     | 46        |
| 2.15 Asistente de intersecciones .....   | 47        |
| 2.16 Aviso de peligro local .....  | 48        |
| 2.17 Aviso inalámbrico de peligro local.....   | 48        |
| 2.18 Luces autoadaptables .....  | 49        |
| 2.19 Indicador de cambio de marcha (GSI).....  | 49        |
| 2.20 Alerta de velocidad .....   | 50        |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.21 Sistema de control de la presión de los neumáticos (TPMS) .....  | 50        |
| 2.22 Sistema paneuropeo de llamada de emergencia en el vehículo<br>(eCall) .....                            | 51        |
| 2.23 Dispositivos de ayuda al aparcamiento .....  | 52        |
| <b>3. DESCRIPCIÓN DE LA ARQUITECTURA .....</b>  | <b>56</b> |
| 3.1 Arquitectura hardware .....   | 57        |
| 3.1.1 IVVI 2.0 .....  | 57        |
| 3.1.2 Webcam .....  | 60        |
| 3.1.3 Alimentación.....   | 61        |
| 3.1.4 Pantalla de visualización.....  | 61        |
| 3.2 Arquitectura software .....   | 62        |
| 3.2.1 Microsoft Visual Studio 2008.....   | 62        |
| 3.2.2 Librería de tratamiento de imagen OpenCV 2.3.1 .....  | 64        |
| <b>4. SISTEMA PROPUESTO .....</b>   | <b>66</b> |
| 4.1 Identificación de la región a analizar.....   | 67        |
| 4.2 Detección de movimiento .....   | 68        |
| 4.3 Determinación de la posibilidad de adelantamiento en base a las<br>características del movimiento ..... | 69        |
| 4.4 Detección de la presencia de vehículos en la imagen.....  | 70        |
| 4.5 Preprocesado de imágenes.....   | 72        |
| 4.6 Seguimiento de vehículos .....  | 75        |
| <b>5. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>   | <b>79</b> |
| <b>6. PRESUPUESTO .....</b>   | <b>81</b> |
| 6.1 Coste de material .....   | 82        |
| 6.2 Coste de personal .....   | 82        |
| 6.3 Presupuesto total .....   | 82        |
| <b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>   | <b>84</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>  | <b>92</b> |
| 1 Ejemplos de movimiento en diferentes situaciones.....   | 93        |



# Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 Ránking de países según número de vehículos a motor por cada 1.000 habitantes.....                  | 19 |
| Figura 1.2. Evolución del número de vehículos en España por cada 1.000 habitantes.....                         | 20 |
| Figura 1.3 Evolución del número de accidentes y su siniestralidad en España.....                               | 21 |
| Figura 1.4 Evolución del número de fallecidos en carretera según el tipo de vía en España.....                 | 21 |
| Figura 1.5 Evolución del número de fallecidos en carretera según tipología del accidente en España.....        | 22 |
| Figura 2.1 Esquema de los elementos del ABS .....  | 29 |
| Figura 2.2 Funcionamiento del ESP.....   | 31 |
| Figura 2.3 Sistema de asistencia a la frenada con radar incorporado .....                                      | 33 |
| Figura 2.4 Funcionamiento del sistema EBD .....  | 35 |
| Figura 2.5 Funcionamiento del control de crucero adaptativo .....  | 37 |
| Figura 2.6 Funcionamiento del sistema de detección de ángulos muertos y asistencia para cambio de carril ..... | 40 |
| Figura 2.7 Funcionamiento del sistema de alerta de cambio involuntario de carril.....                          | 42 |
| Figura 2.8 Sistema de visión nocturna .....  | 43 |
| Figura 2.9 Sistema de protección de peatones y usuarios vulnerables de la vía pública .....                    | 45 |
| Figura 2.10 Información del sistema de reconocimiento de señales .....   | 46 |
| Figura 2.11 Información del sistema de detección y alerta antisueño .....                                      | 47 |
| Figura 2.12 Información del aviso inalámbrico de peligro local.....  | 49 |
| Figura 2.13 Elementos del TPMS .....   | 51 |
| Figura 2.14 Funcionamiento del eCall.....  | 52 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.15 Funcionamiento de los sensores de aparcamiento.....              | 53 |
| Figura 2.16 Cámaras de visión trasera.....                                   | 54 |
| Figura 2.17 Sistemas de estacionamiento automático .....                     | 55 |
| Figura 3.1 Fotografía del IVVI 2.0 .....                                     | 57 |
| Figura 3.2 Ubicación de las cámaras en el IVVI 2.0 .....                     | 58 |
| Figura 3.3 Ubicación de la pantalla en el IVVI 2.0 .....                     | 59 |
| Figura 3.4 Ubicación de los ordenadores en el IVVI 2.0.....                  | 59 |
| Figura 3.5 Cámara Web Logitech QuickCam Express OEM.....                     | 60 |
| Figura 3.6 Pantalla Xenarc 7” 705 YV .....                                   | 62 |
| Figura 4.1 Región de interés a analizar.....                                 | 67 |
| Figura 4.2 Análisis del movimiento en la región de interés .....             | 69 |
| Figura 4.3 Detección de posible vehículo adelantando .....                   | 71 |
| Figura 4.4 Características usadas por el algoritmo Haar-like en cascada..... | 72 |
| Figura 4.5 Imagen preprocesada .....   | 73 |
| Figura 4.6 Diagrama de flujo del programa.....                               | 75 |
| Figura 4.7 Flujograma para la eliminación de falsos positivos .....          | 76 |
| Figura 4.8 Flujograma para la eliminación de la detección intermitente.....  | 77 |
| Figura 4.9 Flujograma final.....   | 78 |

# Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Vehículo circulando normalmente .....          | 93 |
| Tabla 2. Vehículo siendo adelantado .....               | 94 |
| Tabla 3. Vehículo circulando en sentido contrario ..... | 95 |
| Tabla 4. Vehículo girando a la derecha.....             | 96 |
| Tabla 5. Vehículo girando a la izquierda .....          | 97 |





# Capítulo 1

## Introducción

El uso del automóvil se ha convertido en algo imprescindible en los últimos tiempos. Actualmente, los automóviles están continuamente presentes en nuestra vida, desde acciones cotidianas como ir a trabajar o ir de compras hasta acciones más esporádicas como hacer turismo o salir de vacaciones. Una muestra de ello es que en los últimos 25 años se ha duplicado el número de vehículos en España, pasando de 337 vehículos por cada 1000 habitantes en el año 1987 a 678 en 2011, situándonos así en el vigésimo país a nivel mundial en número de vehículos per cápita (datos de 2005), como se puede apreciar en las siguientes ilustraciones.

| Rango | País  | Vehículos de Motor por cada 1000 |
|-------|---|----------------------------------|
| 1     |  Estados Unidos  | 765                              |
| 2     |  Luxemburgo      | 686                              |
| 3     |  Islandia        | 658                              |
| 4     |  Australia       | 619                              |
| 5     |  Malta           | 607                              |
| 6     |  Italia        | 566                              |
| 7     |  Canadá        | 563                              |
| 8     |  Nueva Zelanda | 560                              |
| 9     |  Austria       | 558                              |
| 10    |  Alemania      | 546                              |
| 11    |  Japón         | 543                              |
| 12    |  Irlanda       | 542                              |
| 13    |  Portugal      | 537                              |
| 14    |  Suiza         | 516                              |
| 15    |  Noruega       | 494                              |
| 16    |  Francia       | 491                              |
| 17    |  Eslovenia     | 488                              |
| 18    |  Bélgica       | 484                              |
| 19    |  Finlandia     | 478                              |
| 20    |  España        | 471                              |

Figura 1.1: Ránking de países según número de vehículos a motor por cada 1.000 habitantes [1]

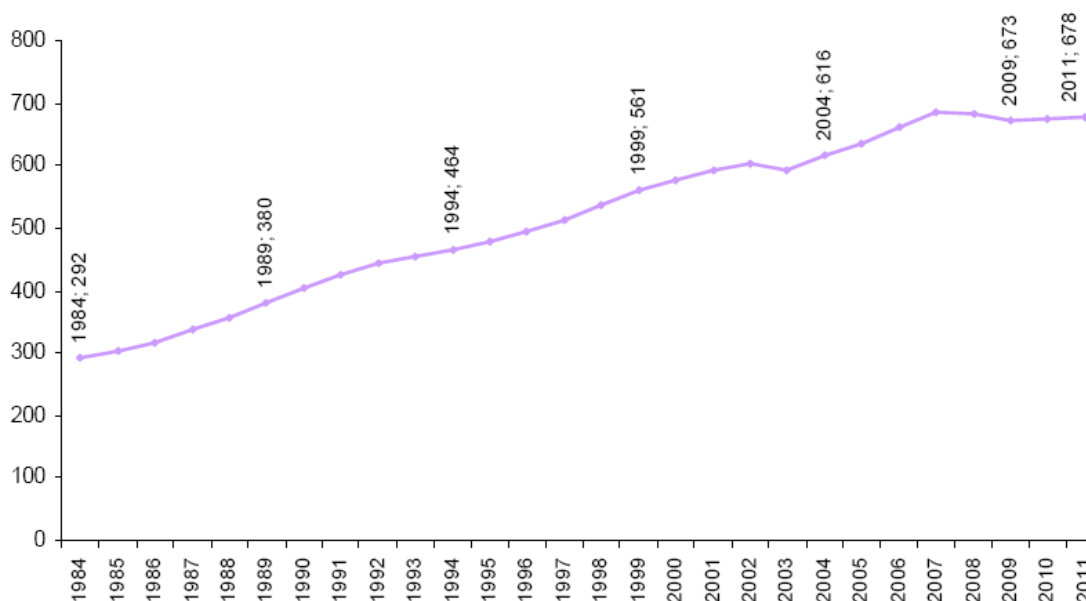


Figura 1.2: Evolución del número de vehículos en España por cada 1.000 habitantes [2]

Nos pasamos gran parte de nuestra vida dentro de los automóviles y, por tanto, la reducción de problemas como los atascos, la contaminación o los accidentes de tráfico se han convertido en uno de los principales objetos de estudio de nuestra sociedad. El objetivo de estos estudios es el de conseguir una conducción más sencilla, eficiente y segura.

De todos estos problemas, el que más preocupa de todos es el de la seguridad. En los últimos años se ha reducido considerablemente el número de muertes por accidente de tráfico en nuestro país, reduciéndose a la mitad en la última década, pero la cifra de casi 2500 fallecidos en el año 2010 sigue siendo muy elevada.

| <b>Total</b>                  | <b>2001</b> | <b>2002</b> | <b>2003</b> | <b>2004</b> | <b>2005</b> | <b>2006</b> | <b>2007</b> | <b>2008</b> | <b>2009</b> | <b>2010</b> |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Accidentes con víctimas       | 100.393     | 98.433      | 99.987      | 94.009      | 91.187      | 99.797      | 100.508     | 93.161      | 88.251      | 85.503      |
| Fallecidos                    | 5.517       | 5.347       | 5.399       | 4.741       | 4.442       | 4.104       | 3.823       | 3.100       | 2.714       | 2.478       |
| Heridos graves                | 26.566      | 26.156      | 26.305      | 21.805      | 21.859      | 21.382      | 19.295      | 16.488      | 13.923      | 11.995      |
| Heridos leves                 | 123.033     | 120.761     | 124.330     | 116.578     | 110.950     | 122.068     | 123.226     | 114.459     | 111.043     | 108.350     |
| Fallecidos por 100 accidentes | 5,5         | 5,4         | 5,4         | 5,0         | 4,9         | 4,1         | 3,8         | 3,3         | 3,1         | 2,9         |

Figura 1.3: Evolución del número de accidentes y su siniestralidad en España [3]

Dentro del tipo de vía donde se producen los accidentes en carretera, cabe destacar la amplia diferencia en el número de víctimas mortales en autopistas y autovías en comparación con el resto de vías (principalmente carreteras secundarias), donde se producen la gran mayoría de las muertes en carretera.

| <b>Víctimas mortales</b> | <b>2001</b>  | <b>2002</b>  | <b>2003</b>  | <b>2004</b>  | <b>2005</b>  | <b>2006</b>  | <b>2007</b>  | <b>2008</b>  | <b>2009</b>  | <b>2010</b>  |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Autopista                | 376          | 322          | 369          | 278          | 219          | 232          | 164          | 109          | 89           | 89           |
| Autovía                  | 772          | 786          | 693          | 643          | 631          | 535          | 447          | 378          | 371          | 325          |
| Resto vías               | 3.395        | 3.327        | 3.418        | 2.920        | 2.802        | 2.600        | 2.471        | 1.979        | 1.670        | 1.514        |
| <b>Total CARRETERA</b>   | <b>4.543</b> | <b>4.435</b> | <b>4.480</b> | <b>3.841</b> | <b>3.652</b> | <b>3.367</b> | <b>3.082</b> | <b>2.466</b> | <b>2.130</b> | <b>1.928</b> |

Figura 1.4: Evolución del número de fallecidos en carretera según el tipo de vía en España [3]

En cuanto a la tipología de los accidentes, se puede resaltar que la principal causa de siniestralidad en carretera en España es la salida de vía, seguido de las colisiones frontales, laterales/frontolaterales y traseras/múltiples.

| <b>Fallecidos en Carretera</b>   | <b>2001</b>  | <b>2002</b>  | <b>2003</b>  | <b>2004</b>  | <b>2005</b>  | <b>2006</b>  | <b>2007</b>  | <b>2008</b>  | <b>2009</b>  | <b>2010</b>  |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Salida de la vía                 | 1.737        | 1.691        | 1.707        | 1.466        | 1.386        | 1.191        | 1.063        | 975          | 834          | 690          |
| Colisión frontal                 | 772          | 793          | 843          | 693          | 688          | 618          | 501          | 443          | 342          | 335          |
| Colisión lateral y frontolateral | 958          | 905          | 907          | 826          | 745          | 560          | 578          | 464          | 371          | 341          |
| Colisión trasera y múltiple      | 332          | 378          | 364          | 303          | 284          | 332          | 259          | 208          | 179          | 197          |
| Atropello a peatón               | 445          | 420          | 407          | 319          | 334          | 284          | 262          | 210          | 191          | 179          |
| Vuelco                           | 83           | 74           | 71           | 70           | 46           | 57           | 64           | 41           | 55           | 48           |
| Otro tipo de accidente           | 216          | 174          | 181          | 164          | 169          | 325          | 355          | 125          | 158          | 138          |
| <b>Total</b>                     | <b>4.543</b> | <b>4.435</b> | <b>4.480</b> | <b>3.841</b> | <b>3.652</b> | <b>3.367</b> | <b>3.082</b> | <b>2.466</b> | <b>2.130</b> | <b>1.928</b> |

Figura 1.5: Evolución del número de fallecidos en carretera según tipología del accidente en España [3]

Por todo lo expuesto anteriormente, se explica el por qué del enorme auge de los sistemas de ayuda a la conducción, basados en las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), que permiten el desarrollo de sistemas inteligentes (ADAS, siglas en inglés de Sistemas Avanzados de Ayuda a la Conducción), capaces de ayudar al conductor en la conducción, evitando o disminuyendo el riesgo de accidente y ofreciéndole información en tiempo real sobre el estado del vehículo, de la vía o de las carreteras en general, con el fin de llevar a cabo una conducción más eficiente y sencilla. Algunos de estos sistemas ya están implantados en la gran mayoría de los coches (tales como el ABS o el ESP), mientras que muchos otros están todavía en proceso de investigación o implantación.

Inicialmente, las investigaciones iban dirigidas en el ámbito de la seguridad pasiva, que se encarga de minimizar los posibles daños causados en caso de que se produjera un accidente (diseño de estructuras de deformación del vehículo para la mejor absorción de la energía en caso de impacto, incorporación de los cinturones de seguridad, airbag...). A partir de la década de los 70, debido a la introducción de la electrónica y la informática, aparecen una serie de sistemas orientados a la seguridad activa, encargada de disminuir el riesgo de que se produzcan accidentes (sistemas como el ABS, sistema de antibloqueo de las ruedas cuando se produce una frenada a fondo, regulando la presión sobre los frenos para evitar que los neumáticos pierdan la adherencia con el suelo, o el ESP, control electrónico de estabilidad, que detecta la desviación de la trayectoria del vehículo con respecto a la dirección que debería llevar, actuando sobre cada una de las ruedas por separado, para evitar derrapes). Actualmente, las compañías están trabajando en sistemas que, además de garantizar la seguridad, optimicen las prestaciones de los vehículos y mejoren las capacidades de los conductores (sistemas de detección de ángulo muerto, de aviso de cambio involuntario de carril, de visión nocturna, de control y alerta de sueño, de detección de señales y peatones, control de cruce adaptativo, asistente de cruces...).

### **1.1-Objetivos del trabajo**

El presente trabajo tiene como finalidad la creación de una aplicación que determine cuándo un vehículo nos está adelantando, utilizando un sistema de fusión sensorial, basado en una cámara de vídeo, capaz de detectar por un lado la presencia del vehículo en su campo de visión, y por otro lado el movimiento de dicho vehículo para determinar el sentido de circulación del mismo. Los sistemas de fusión sensorial son los más utilizados en investigación en la actualidad, debido a la falta de sensores altamente fiables que cumplan las exigencias requeridas. De modo que, mediante la combinación de varios sistemas, podemos conseguir un nuevo sistema de mayor fiabilidad que los dos anteriores. Este nuevo sistema puede servir de

base para futuras investigaciones, y podrá ser combinado con otros para dar lugar a una nueva aplicación aún más fiable y precisa.

Como principales objetivos de nuestro trabajo podemos destacar que:

-ayudará a reducir accidentes, pues en caso de que el vehículo que nos está adelantando se encuentre en un ángulo muerto, nos avisará de su presencia, lo que puede ser útil cuando nos disponemos a adelantar a otro vehículo y al mismo tiempo estamos siendo adelantados, pues el sistema nos avisará de dicha situación para que pospongamos nuestra maniobra. Esto puede ser muy útil en el caso de autopistas y autovías, pero sobre todo, en carreteras convencionales, donde se producen el 75% de las víctimas mortales en accidentes de tráfico en nuestro país, y ayudará a reducir los accidentes por salida de vía y colisión lateral que, como ya se vio anteriormente, son la primera y tercera causa de muerte en carretera en España.

-ofrecerá a las compañías que lo comercialicen un rasgo diferenciador, que proporcione valor añadido a su producto, ya que en un mercado tan competitivo como el del automóvil, cualquier mínimo detalle puede ser determinante en la decisión del cliente final.

-servirá de base para investigaciones futuras, como ya se comentó en el párrafo introductorio de esta sección.

## **1.2-Estructura de la memoria**

El presente documento se divide en siete capítulos, el primero de los cuales es esta introducción, que incluye una breve presentación del marco actual en el campo de los accidentes de tráfico y los sistemas de ayuda a la conducción, además de los objetivos del trabajo y la estructura de la memoria.

En el capítulo 2 se desarrolla el estado del arte, que consta de una breve introducción a los coches inteligentes y una breve descripción de los sistemas de ayuda a la conducción existentes en la actualidad.



El capítulo 3 describe las herramientas, tanto hardware como software, utilizadas para el desarrollo del proyecto.

En el capítulo 4 se detallan los pasos seguidos para la elaboración del proyecto, incluyendo todos los cambios sufridos en el programa hasta llegar a la solución final.

El capítulo 5 muestra los resultados obtenidos de nuestro trabajo y aborda las conclusiones extraídas del trabajo, eco de los objetivos planteados en la introducción, y presenta posibles trabajos futuros y recomendaciones.

En el capítulo 6 se desarrolla el presupuesto, tanto del material utilizado como del personal involucrado en el desarrollo del proyecto.

El capítulo 7 detalla las referencias utilizadas para la elaboración de la memoria.

Por último, se incluye un anexo con una serie de tablas obtenidas en el proceso de trabajo.

# **Capítulo 2**

## **Estado del arte**

Los sistemas de ayuda a la conducción integrados en los vehículos ayudan a los conductores a evitar o mitigar un accidente, detectando la naturaleza e importancia del peligro. Dependiendo de la importancia de la amenaza, estos sistemas a bordo tienen los siguientes objetivos:

- Alertar al conductor lo antes posible de un peligro inminente.
- Avisar al conductor si no hay reacción por su parte a la primera alerta.
- Asistir de forma activa o, en última instancia, intervenir para prevenir el accidente o mitigar sus consecuencias.
- Ayudar a mantener una velocidad segura.
- Ayudar a mantener la distancia de seguridad con otros vehículos.
- Ayudar a conducir sin salirse del carril.
- Evitar los adelantamientos peligrosos.
- Atravesar los cruces con seguridad.
- Evitar los atropellos de usuarios vulnerables de la vía pública.
- Reducir la gravedad de un accidente si, a pesar de todo, llegara a ocurrir.

[4]

A continuación se exponen algunos de los sistemas de ayuda a la conducción más habituales en los vehículos actuales.

## **2.1-Sistema antibloqueo de frenos (ABS)**

El ABS (*Antilock Braking System*, sistema de antibloqueo de frenos) es un dispositivo utilizado en aviones y en automóviles, para evitar que los neumáticos pierdan la adherencia con el suelo durante un proceso de frenado.

El sistema fue desarrollado inicialmente para los aviones, los cuales acostumbran a tener que frenar fuertemente una vez han tomado tierra. En 1978 Bosch hizo historia cuando introdujo el primer sistema electrónico de frenos antibloqueo. Esta tecnología se ha convertido en la base para todos los sistemas electrónicos que utilizan de alguna forma el ABS, como por ejemplo los controles de tracción y de estabilidad. Con el tiempo el ABS se ha ido generalizando, de forma que en la actualidad la gran mayoría de los automóviles y camiones de fabricación reciente disponen de él. El ABS se

convirtió en un equipo de serie obligatorio en todos los turismos fabricados en la Unión Europea a partir del 1 de julio de 2004, gracias a un acuerdo voluntario de los fabricantes de automóviles. Hoy día se desarrollan sistemas de freno eléctrico que simplifican el número de componentes, y aumentan su eficacia.

El ABS funciona en conjunto con el sistema de frenado tradicional. Consiste en una bomba que se incorpora a los circuitos del líquido de freno y en unos detectores que controlan las revoluciones de las ruedas. Si en una frenada brusca una o varias ruedas reducen repentinamente sus revoluciones, el ABS lo detecta e interpreta que las ruedas están a punto de quedar bloqueadas sin que el vehículo se haya detenido. Esto quiere decir que el vehículo comenzará a deslizarse sobre el suelo sin control, sin reaccionar a los movimientos del volante. Para que esto no ocurra, los sensores envían una señal al Módulo de Control del sistema ABS, el cual reduce la presión realizada sobre los frenos, sin que intervenga en ello el conductor. Cuando la situación se ha normalizado y las ruedas giran de nuevo correctamente, el sistema permite que la presión sobre los frenos vuelva a actuar con toda la intensidad. El ABS controla nuevamente el giro de las ruedas y actúa otra vez si éstas están a punto de bloquearse por la fuerza del freno. En el caso de que este sistema intervenga, el procedimiento se repite de forma muy rápida, unas 50 a 100 veces por segundo, lo que se traduce en que el conductor percibe una vibración en el pedal del freno. El ABS permite que el conductor siga teniendo el control sobre la trayectoria del vehículo, con la consiguiente posibilidad de poder esquivar posibles obstáculos mediante el giro del volante de dirección. [5]

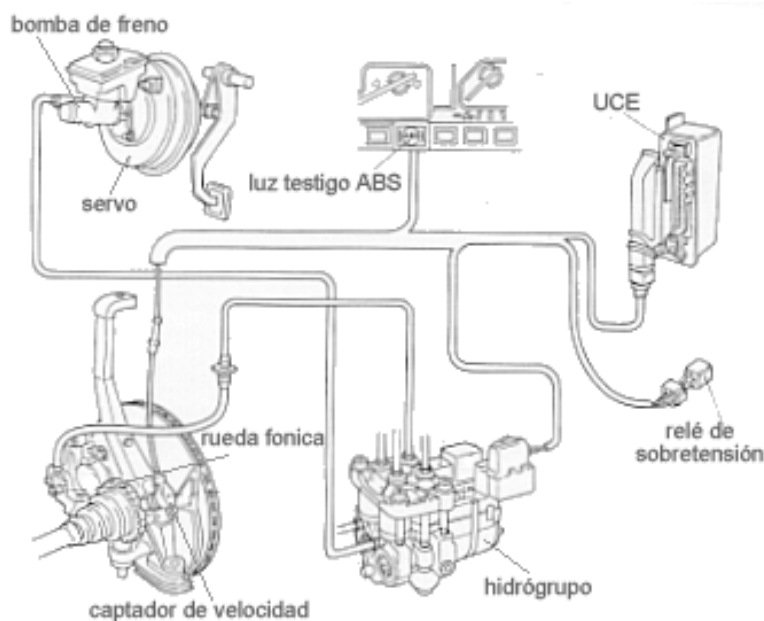


Figura 2.1. Esquema de los elementos del ABS [6]

## **2.2-Control electrónico de estabilidad (ESP)**

El control de estabilidad es un elemento de seguridad activa del automóvil que actúa frenando individualmente las ruedas en situaciones de riesgo para evitar derrapes, tanto sobrevirajes, como subvirajes. El control de estabilidad centraliza las funciones de los sistemas ABS, EBD y de control de tracción.

El control de estabilidad fue desarrollado por Bosch en 1995, en cooperación con Mercedes-Benz y fue introducido al mercado en el Mercedes-Benz Clase S bajo la denominación comercial *Elektronisches Stabilitätsprogramm* (en alemán "Programa Electrónico de Estabilidad", abreviado ESP). El ESP recibe otros nombres, según los fabricantes de vehículos en los que se monte, tales como *Vehicle Dynamic Control* ("control dinámico del vehículo", VDC), *Dynamic Stability Control* ("control dinámico de estabilidad", DSC), *Electronic Stability Control* ("control electrónico de estabilidad", ESC) y *Vehicle Stability Control* ("control de estabilidad del vehículo", VSC), si bien su funcionamiento es el mismo.

El sistema consta de una unidad de control electrónico, un grupo hidráulico y un conjunto de sensores:

- sensor de ángulo de dirección: está ubicado en la dirección y proporciona información constante sobre el movimiento del volante, es decir, la dirección deseada por el conductor.

- sensor de velocidad de giro de rueda: son los mismos del ABS e informan sobre el comportamiento de las mismas (si están bloqueadas, si patinan...)

- sensor de ángulo de giro y aceleración transversal: proporciona información sobre desplazamientos del vehículo alrededor de su eje vertical y desplazamientos y fuerzas laterales, es decir, cual es el comportamiento real del vehículo y si está comenzando a derrapar y desviándose de la trayectoria deseada por el conductor.

El ESP está siempre activo. Un microordenador controla las señales provenientes de los sensores del ESP y las chequea 25 veces por segundo para comprobar que la dirección que desea el conductor a través del volante se corresponde con la dirección real en la que se está moviendo el vehículo. Si el vehículo se mueve en una dirección diferente, el ESP detecta la situación crítica y reacciona inmediatamente, independientemente del conductor. Utiliza el sistema de frenos del vehículo para estabilizarlo. Con estas intervenciones selectivas de los frenos, el ESP genera la fuerza contraria deseada para que el vehículo pueda reaccionar según las maniobras del conductor. El ESP no sólo inicia la intervención de los frenos, también puede reducir el par del motor para reducir la velocidad del vehículo. De esta manera el coche se mantiene seguro y estable, dentro siempre de los límites de la física. [7]

## Programa de Estabilidad Electrónica de Bosch

Subviraje

Sobreviraje

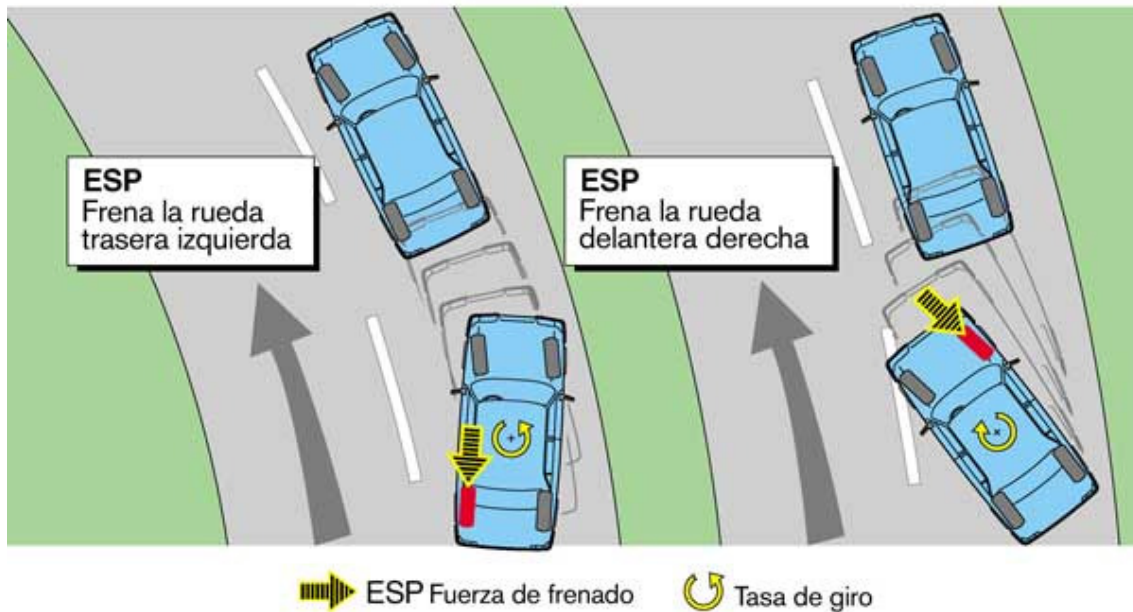


Figura 2.2: Funcionamiento del ESP [8]

### 2.3-Sistema electrónico de asistencia a la frenada de emergencia (BAS)

BAS también denominado EBA, son las siglas de *Brake Assist System* o *Electronic Brake Assist*, que traducidas en inglés significan, sistema electrónico de asistencia o ayuda a la frenada de emergencia. Un sistema de seguridad del automóvil ideado por Mercedes-Benz que combinado con el ABS se encarga de que la frenada sea lo más corta posible aprovechando la capacidad de frenado ante cualquier emergencia.

El sistema BAS, por un lado mide la velocidad con la que se suelta el pedal del acelerador y se pisa el freno. Y por otro lado, calcula la presión utilizada en el sistema de frenado para interpretar si nos encontramos ante una frenada de emergencia. De esta manera, dicho dispositivo aumenta la presión de frenado consiguiendo reducir la distancia de frenada con la ayuda del conductor.

Muchos accidentes se deben a un deficiente frenado ante una frenada brusca del vehículo de delante. También, podemos frenar demasiado tarde por varios motivos: por conducir distraído o desatento, con escasa visibilidad, por ejemplo cuando se conduce con un sol bajo, etcétera. La mayoría de conductores no están acostumbrados a tratar con este tipo de situaciones críticas y no saben aplicar la fuerza suficiente de frenado para evitar, por ejemplo, una colisión por alcance. Con el desarrollo de nuevas tecnologías como el *Autonomous Emergency Braking* o AEB parecido al BAS, pueden ayudar al conductor a evitar este tipo de accidentes o, al menos, reducir su gravedad. Son varias las modalidades de sistemas que podemos agruparlos en autónomos (donde el sistema actúa con independencia de que el conductor pueda evitar el accidente) y a su vez de emergencia, cuando el sistema sólo interviene en una situación crítica o cuando el sistema trata de evitar el accidente mediante la aplicación de los frenos.

También en este tipo de sistemas, ya más modernos, se utiliza tecnología de radar para identificar los posibles obstáculos por delante del coche. Dicha información se combina electrónicamente con la velocidad y trayectoria del vehículo. De esa manera, si una posible colisión es detectada, los sistemas de ayuda al frenado en general, en primer lugar tratan de evitar el impacto al advertir al conductor que es necesario actuar y en el caso de no tomarse medidas, el sistema aplicará los frenos.

Desde el punto de vista de su complejidad técnica, el sistema BAS es relativamente simple. Sus principales elementos son el sensor de velocidad o fuerza situado en el pedal del freno, la válvula que aumenta la presión en el circuito de frenos y la centralita electrónica que gestiona todo el sistema. Elementos que aportan seguridad en el automóvil y al mismo tiempo son complementados por otros. Por eso, muchos modelos de coches además de ir equipados con el asistente de frenado o BA, llevan también el sistema de frenos antibloqueo o ABS y la distribución electrónica de frenado o EBD. El sistema de ayuda a la frenada BAS, una vez que identifica la situación de emergencia, activa una válvula electromecánica situada normalmente en el servofreno para incrementar la presión en el circuito hidráulico de frenos, presión que se transmite instantáneamente a las pastillas y discos de freno. Algunos sistemas BAS aplican directamente la máxima intensidad de frenada que el vehículo es capaz de proporcionar, mientras que otros son



capaces de regularla de modo proporcional a la fuerza ejercida sobre el pedal del freno por el conductor. Para evitar que el aumento brusco de la intensidad de la frenada produzca un repentino bloqueo de las ruedas, el sistema de ayuda a la frenada BAS funciona de modo sincronizado con otro de los sistemas básicos de seguridad activa, el sistema antibloqueo de frenos ABS. Mientras que el primero aumenta rápidamente la presión en el circuito de frenos para conseguir la máxima intensidad de frenada, el segundo sistema la modula para evitar que se produzca el bloqueo de ruedas y la pérdida subsiguiente de control del vehículo. Por otro lado, si el conductor suelta exageradamente el pedal de freno dicho sistema interpreta que ha desaparecido la necesidad de frenar a fondo y se desconecta. [9]

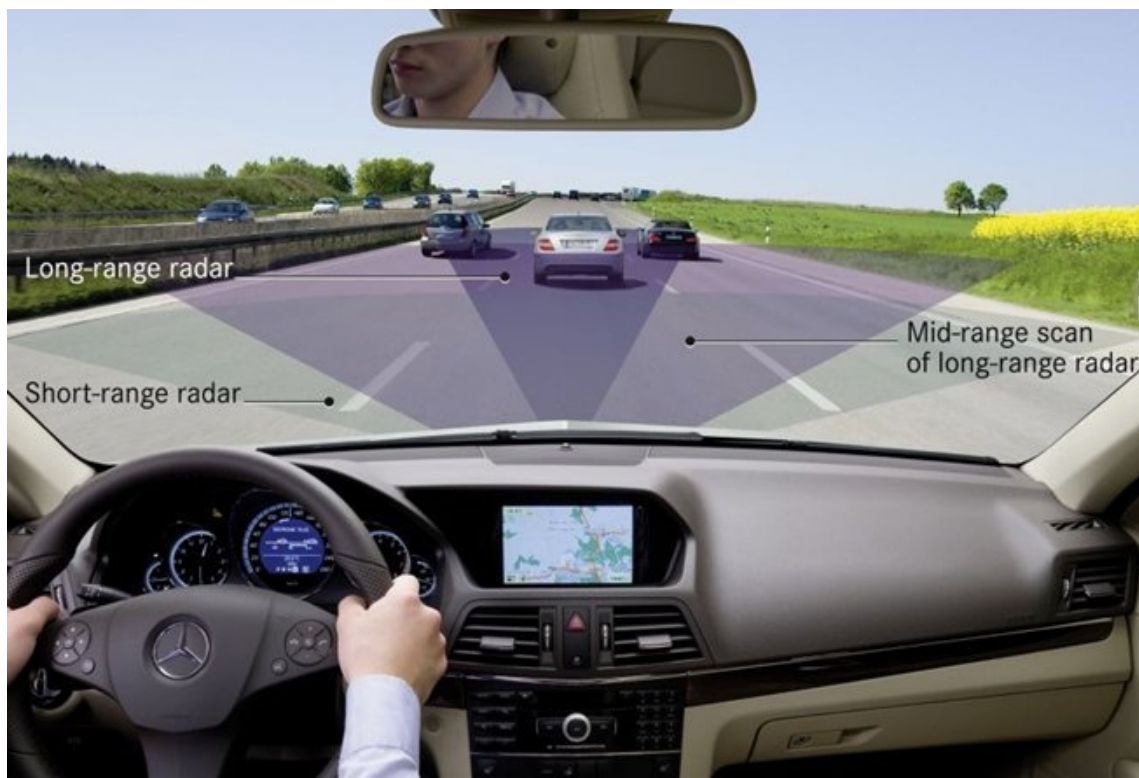


Figura 2.3: Sistema de asistencia a la frenada con radar incorporado

## **2.4-Sistema de reparto electrónico de frenada (EBD)**

El reparto electrónico de frenada (llamado comercialmente EBV o EBD según los distintos fabricantes) es un sistema electrónico que determina cuánta fuerza aplicar a cada rueda para detener al vehículo en un distancia mínima y sin que se descontrola.

La Distribución Electrónica de Frenado (EBD, *Electronic Brake Distribution*), consiste en que los sistemas de frenos antibloqueo de cuatro canales (uno por rueda) permiten adoptar una lógica de control que distribuye electrónicamente la fuerza de frenado entre el eje delantero y el eje trasero. Este reparto de fuerza de frenante se utiliza para compensar el estado de carga del vehículo y la transferencia de masas que existe entre los ejes delanteros y traseros al frenar. En los sistemas de frenos convencionales, esta función recae en los correctores mecánicos de presión hidráulica, colocados cerca del eje trasero, pero el funcionamiento de estos correctores simplemente consigue acercarse a la distribución ideal de la frenada, por el contrario, la distribución electrónica de la frenada consigue casi igualar a la distribución ideal al mantener la presión hidráulica del circuito sobre las pinzas de los frenos traseros de forma activa.

La distribución electrónica de la frenada actúa antes de entrar en funcionamiento la secuencia del sistema antibloqueo que evita el bloqueo de las ruedas del eje trasero, al detectarse el inicio del bloqueo de alguna rueda trasera. La central adopta la fase de mantenimiento de la presión hidráulica en la pinza de freno de dicha rueda, el mantenimiento de la presión se consigue al conmutar la válvula de entrada del modulador hidráulico del sistema antibloqueo. Basa su actuación en el mantenimiento de la presión siendo innecesario que la bomba del modulador hidráulico entre en funcionamiento o se active la fase de aumento de presión sobre los frenos traseros, de esta forma desaparecen los ruidos de funcionamiento del sistema antibloqueo y el característico contragolpe en el pedal de freno.

En algunas situaciones pueden producirse breves aumentos en el deslizamiento de las ruedas traseras que se corrigen reduciendo la presión por parte de la distribución electrónica de la frenada y no del sistema antibloqueo, en este caso, la fase de reducción de presión envía el líquido de frenos sobrante al acumulador del modulador hidráulico. Por lo tanto,

evitando en un principio que se ponga en funcionamiento la bomba eléctrica del sistema antibloqueo hasta que se completa la secuencia de frenado. [10]

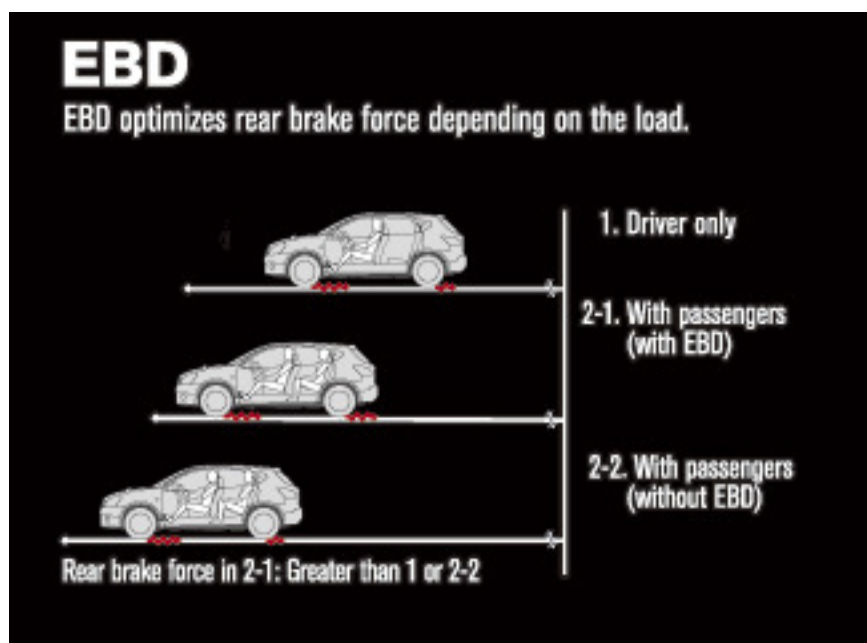


Figura 2.4: Funcionamiento del sistema EBD

### **2.5-Sistema de control de tracción (ASR)**

El control de tracción es un sistema de seguridad automovilística lanzado al mercado por Bosch en 1986 e implantado por la marca Mercedes-Benz. Fue diseñado para prevenir la pérdida de adherencia de las ruedas y que éstas patinen cuando el conductor se excede en la aceleración del vehículo o el firme está muy deslizante (ej.: hielo).

Funciona de tal manera que, mediante el uso de los mismos sensores y accionamientos que emplea el sistema ABS, se controla si en la aceleración una de las ruedas del eje motor del automóvil patina, es decir, gira a mayor velocidad de la que debería, y, en tal caso, el sistema actúa con el fin de reducir el par de giro y así recuperar la adherencia entre neumático y firme, realizando una (o más de una a la vez) de las siguientes acciones:

- retardar o suprimir la chispa a uno o más cilindros.
- reducir la inyección de combustible a uno o más cilindros.
- frenar la rueda que ha perdido adherencia.

Algunas situaciones comunes en las que puede llegar a actuar este sistema son las aceleraciones bruscas sobre firmes mojados y/o con grava, así como sobre caminos de tierra y en superficie helada. En situaciones de acumulación de nieve virgen, barro o arena conviene desconectar el sistema, a través del botón de desconexión, ya que en ese tipo de situaciones la única forma de que el vehículo avance es si las ruedas patinan. Si el sistema está activo, en cuanto las ruedas patinen, el sistema lo detectará y comenzará a cortar inyección y, por tanto, parar al motor, con lo que las ruedas tenderán a enterrarse más.

Las siglas más comunes para denominar este sistema son ASR (o *Anti-Slip Regulation*) y TCS (*Traction Control System*). [11]

## **2.6-Sistema de control de velocidad de cruce adaptativo (ACC)**

El control de cruce adaptativo (ACC, *Adaptive Cruise Control*) es un sistema de control de cruce que permite reconocer y anticiparse a los peligros que te preceden.

Durante los viajes largos, especialmente en autopistas y autovías, la conducción puede hacerse especialmente rutinaria y pesada puesto que el conductor, para adaptarse constantemente a las situaciones, prácticamente sólo debe acelerar o frenar su vehículo. Por ello existen los sistemas de control de cruce que nos permiten mantener una velocidad constante previamente fijada por el conductor y que se desconectará automáticamente si pisamos el freno.

Hoy en día casi todos los coches traen de serie este sistema pero la evolución de la tecnología nos trae muchas mejoras con respecto a este sistema y el futuro inmediato está en los controles de cruce adaptativos que ya montan muchos coches de alta gama. El control de cruce adaptativo es una evolución del anterior y ahora se muestra más inteligente

y tiene en cuenta el tráfico a la hora de mantener la velocidad con lo que el conductor no tendrá que estar acoplándose continuamente a las condiciones de la carretera.

El control de crucero adaptativo cuenta con una serie de radares que se encargan de detectar el tráfico en la vía, de tal manera que si nos encontramos con un coche por delante a una velocidad inferior, automáticamente el sistema alerta al conductor del peligro y reduce la velocidad de nuestro vehículo actuando sobre el sistema de frenos, de forma que se mantiene la distancia de seguridad que haya sido predeterminada. Una vez que el carril por el que circulamos queda libre, el sistema acelera el vehículo hasta la velocidad que hayamos programado. [12]

### CONTROL DE CRUCERO ADAPTABLE (ACC)

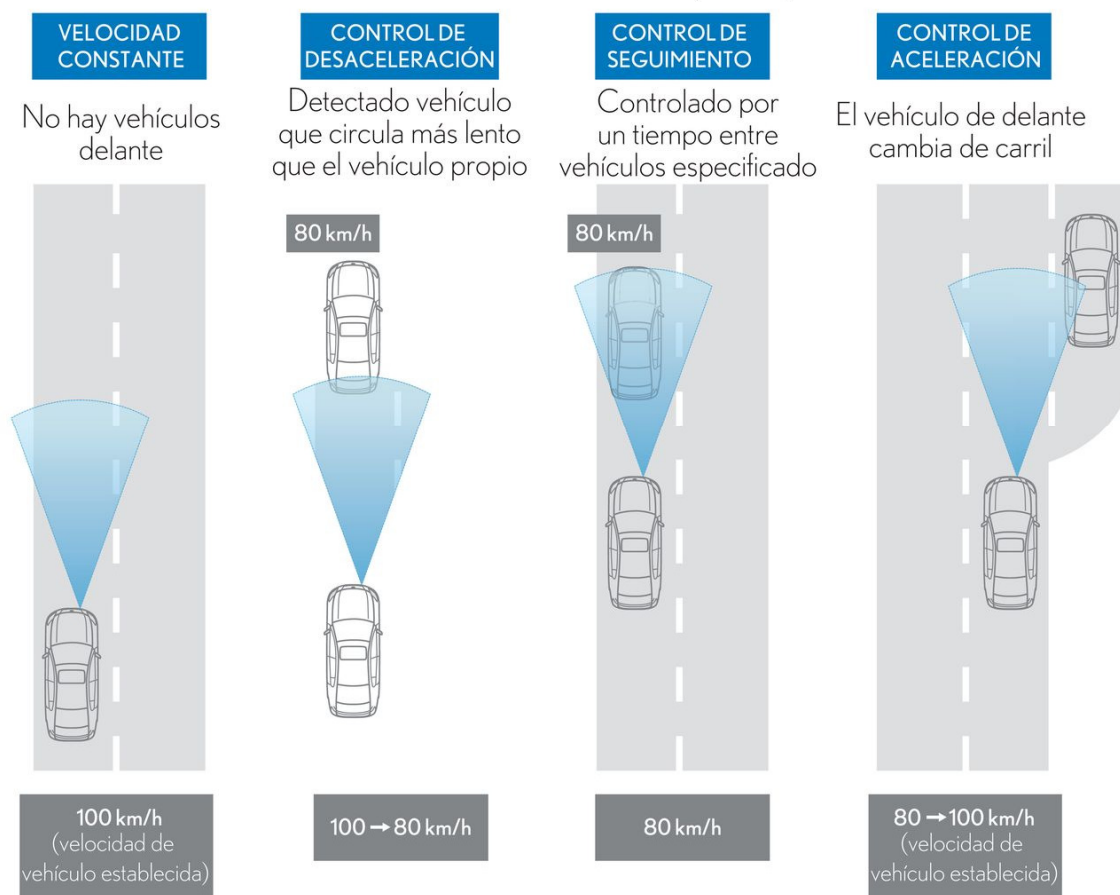


Figura 2.5: Funcionamiento del control de crucero adaptativo

## **2.7-Limitador de velocidad**

El limitador de velocidad es un sistema que permite al conductor establecer una velocidad máxima a la que desea circular. Se diferencia del regulador y del control de crucero porque no obliga a circular siempre a dicha velocidad sino que sólo actúa cuando el conductor rebasa el umbral establecido. Cuando esto ocurre, el sistema avisa con señales acústicas y luminosas.

Los primeros limitadores de velocidad aplicados en los automóviles nacieron como un invento estadounidense (por sus carreteras con interminables rectas y estrictos controles de velocidad) para ayudar a sus conductores a controlar la presión que se ejerce sobre el pedal del acelerador y para no tener que estar constantemente observando el velocímetro. Eran los limitadores mecánicos, pero desde la llegada de la inyección el control se realiza por medios electrónicos encontrándose los mandos de dicho dispositivo generalmente en el volante o en un lugar próximo y viéndose reflejado su funcionamiento en el tablero de instrumentos mediante un testigo que avisa al conductor.

En España, desde el año 2001, en la fabricación de vehículos incorporan los limitadores de velocidad activos y pasivos de serie, es decir, avisan al conductor mediante el endurecimiento del tacto sobre el pedal del acelerador y mediante sonido y testigo de luz cuando se rebasa la velocidad indicada o establecida por el propio conductor. Actualmente y en vehículos de gama alta están mejorando estos limitadores convirtiéndolos además en reguladores y controles inteligentes de velocidad para mantener la distancia de seguridad y evitar las colisiones por alcance. El limitador de velocidad pasivo es meramente informativo mientras se conduce y nos evita tener que mirar constantemente el velocímetro del coche. Sin embargo, el activo impide superar la velocidad establecida mientras lo decida así su conductor o se interrumpa tras una maniobra de emergencia. De hecho, la persona que va al mando del vehículo podrá desactivar el limitador si supera la velocidad programada y activarlo nuevamente cuando la velocidad desciende de nuevo por debajo del límite indicado.

Saber su funcionamiento es muy importante para sacarle el máximo rendimiento. Por ejemplo, los limitadores son muy útiles en autopistas,



autovías, en trayectos largos e incluso en ciudad por evitar la tensión que produce estar pendiente de los límites de velocidad y radares fijos permitiendo prestar más atención al resto de las circunstancias del tráfico. Está claro que su uso evita que por descuido se exceda el límite de velocidad y así evitar una posible multa y la detracción de puntos. Además, una conducción irregular pegando frenazos y acelerones aumenta el consumo y en consecuencia el gasto. [13]

## **2.8-Sistema de detección de ángulos muertos y asistencia para cambio de carril**

El sistema de detección de ángulos muertos es un sistema desarrollado con el objeto de evitar aquellos accidentes producidos por la presencia de un vehículo junto al lateral de otro que realiza una maniobra de cambio de carril o giro, situado fuera del alcance visual de sus espejos retrovisores.

Si el sistema sólo cubre la función de detección de ángulos muertos, el área que se monitoriza o vigila suele estar en un entorno de 4 metros a un lado del vehículo y aproximadamente 10 metros por detrás. Cuando el rango de detección del sistema pasa a ser de varias decenas de metros por detrás del vehículo y además su unidad de control es capaz de calcular la velocidad a la que un vehículo se nos está acercando por el carril adyacente, el sistema de detección de ángulos muertos pasa a ser un sistema más avanzado, conocido como sistema de asistencia para cambios de carril.

Estos sistemas comienzan a actuar por encima de una determinada velocidad (que puede variar dependiendo del fabricante) y permiten ser conectados o desconectados a voluntad del conductor mediante el correspondiente botón en la consola del vehículo. Normalmente estos sistemas tienen dos niveles de actuación, uno de información y otro de alerta. En el primero de ellos, el sistema informa al conductor de la presencia de un vehículo circulando por detrás y por un lateral del vehículo. La forma en que ésta información se presenta es usualmente mediante una señal luminosa, bien en el propio espejo retrovisor del lado en el que se ha detectado o bien en una zona próxima al mismo.

Si además el conductor del vehículo que dispone del sistema de detección de ángulos muertos o de asistencia al cambio de carril manifiesta una posible intención de desplazamiento hacia el lado donde se ha detectado otro vehículo (accionando por ejemplo el intermitente correspondiente), el sistema pasa a un segundo nivel de alerta, donde la señal visual anterior cambia (por ejemplo de intermitente a fija o al contrario) y además se produce un aviso acústico.

La gran mayoría de los sistemas de detección de ángulos muertos y asistencia al cambio de carril que actualmente existen en el mercado utilizan sensores de radar (con alcances que pueden llegar hasta los 60 metros por detrás del vehículo que lo lleva instalado) para la detección de vehículos en los laterales. Sin embargo existen otros sistemas que utilizan cámaras situadas en la base de los propios espejos retrovisores para realizar esta función. [14]

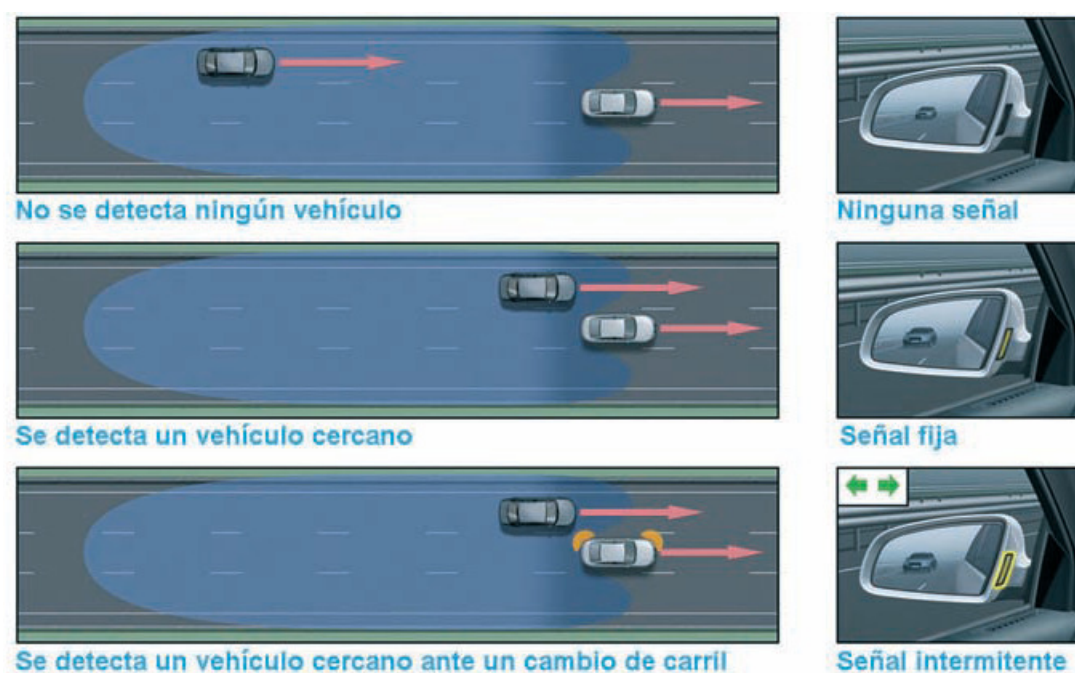


Figura 2.6: Funcionamiento del sistema de detección de ángulos muertos y asistencia para cambio de carril



## **2.9-Sistema de alerta de cambio involuntario de carril (LDW)**

El sistema de alerta de cambio involuntario de carril (LDW, *Lane Departure Warning*) trata de evitar los accidentes provocados por distracciones del conductor, avisando a éste de salidas de carril no intencionadas.

A través de sensores infrarrojos situados en la parte inferior del paragolpes delantero o a través de cámaras dinámicas instaladas detrás del parabrisas, junto al espejo retrovisor, el sistema registra y detecta continuamente las marcas viales del carril de circulación. En el caso de un cambio de carril imprevisto, sin el uso necesario del intermitente (precisamente ante la ausencia de señalización de intermitente, el sistema interpreta que el cambio es involuntario), alertará al conductor bien mediante un testigo luminoso en el panel de instrumentos, bien emitiendo una señal acústica o bien haciendo vibrar el asiento del conductor. El conductor, al percatarse debe corregir la conducción para regresar de forma segura a su carril de circulación o bien hacer uso del preceptivo intermitente.

Las últimas generaciones de sistemas LDW incluso realizan pequeñas intervenciones automáticas sobre el volante de dirección, indicando con ello al conductor la dirección en la que debe girar. Ofrecen diferentes posibilidades en el margen de activación del aviso de forma que el conductor puede ser alertado incluso antes de que el vehículo llegue a cruzar la línea divisoria del carril de circulación. [15]

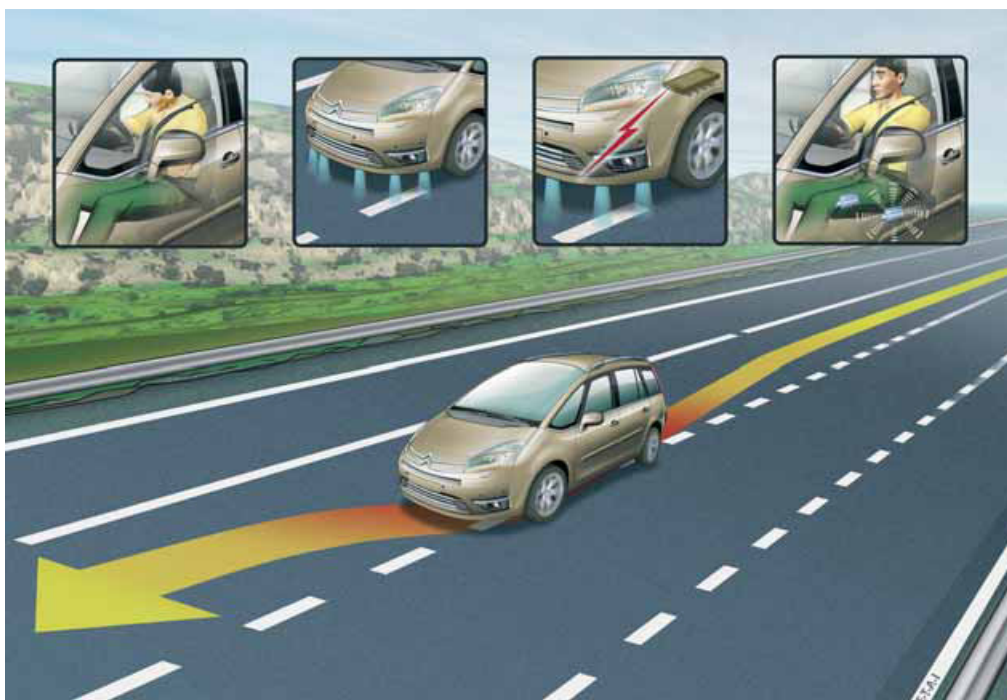


Figura 2.7: Funcionamiento del sistema de alerta de cambio involuntario de carril

### **2.10-Sistema de visión nocturna (NV)**

El sistema de visión nocturna (NV, *Night Vision*) proporciona un aumento de la visibilidad del conductor en la oscuridad y en condiciones de baja visibilidad, mostrando la situación de la carretera en tiempo real en una pantalla integrada en el tablero de instrumentos o bien proyectando la imagen en el propio parabrisas.

Como su propio nombre indica, el sistema Night Vision está pensado para ser utilizado fundamentalmente por la noche, o en condiciones de baja luminosidad. Concretamente aquellas situaciones en las que el uso de las luces de carretera (largas) sería normal, el uso del sistema Night Vision adquiere su máxima utilidad.

El sistema Night Vision está basado en tecnología infrarroja. Los emisores se encuentran instalados en el frontal del vehículo, por ejemplo detrás de la parrilla frontal, o integrados en los propios faros. Una cámara especial instalada en el interior del parabrisas, cercana al espejo retrovisor, recibe

los datos de los emisores infrarrojos y genera una imagen de video procesada electrónicamente que es mostrada en una pantalla TFT integrada en el salpicadero o directamente proyectada en el parabrisas. La cámara recoge los fotones (energía infrarroja) que inciden sobre los píxeles del dispositivo, que actúa de algún modo como las televisiones: una vez que los fotones alcanzan uno de los numerosos píxeles, la temperatura de éste varía y en consecuencia también su capacitancia. La cámara interpreta estas diferentes capacitancias para crear una imagen, proyectándola directamente sobre el propio parabrisas o mostrándosela en una pantalla integrada en el salpicadero.

Dependiendo del fabricante, los sistemas Night Vision están basados en tecnología infrarroja cercana o lejana, la cuál detecta las radiaciones térmicas infrarrojas del entorno. [16]



Figura 2.8: Sistema de visión nocturna

### **2.11-Sistema de aviso de obstáculos o de colisión**

Los sistemas de aviso de obstáculos o de colisión ayudan al conductor a evitar accidentes o a atenuar sus consecuencias al detectar vehículos u otros obstáculos presentes ante él en la carretera y avisar en caso de colisión inminente.

Las soluciones actuales, de funcionamiento limitado, son una función complementaria del control de la velocidad de cruce, que utilizan información obtenida por los sensores radar para generar avisos acústicos y visuales. Los sistemas del futuro utilizarán sensores radar de largo y corto alcance o sistemas LIDAR (*Light Detection and Ranging*, detección y escalado de luz) y procesamiento de imágenes de vídeo o una combinación de estos dispositivos.

Además de avisar al conductor, este sistema puede también:

- precargar el circuito de frenos para que actúen de inmediato a la máxima potencia (asistencia a la frenada) en cuanto el conductor pise el freno,
- disponer los airbags o tensar los cinturones de seguridad para preparar el vehículo a una colisión inminente. [17]

### **2.12- Sistema de protección de peatones y usuarios vulnerables de la vía pública**

Es un sistema que ayuda a evitar colisiones y protege a los usuarios vulnerables de la vía pública, como peatones y ciclistas.

Una serie de sistemas de sensores (generalmente una combinación de varios tipos) vigilan la zona que se encuentra delante del vehículo, detectan de forma fiable a los usuarios vulnerables de la calzada y los distinguen de otros obstáculos.

El sistema utiliza diferentes accionadores, como el frenado autónomo o la asistencia a la frenada, que ayudan a evitar las colisiones o disminuyen significativamente sus consecuencias al reducir la velocidad del vehículo antes del impacto. .

Si no se puede evitar la colisión, se activan los accionadores de protección estructurales (por ejemplo, airbags en el parachoques, elevación del capó del coche, etc.), que limitan el riesgo de lesiones graves o incluso salvan la vida de los usuarios vulnerables. [18]

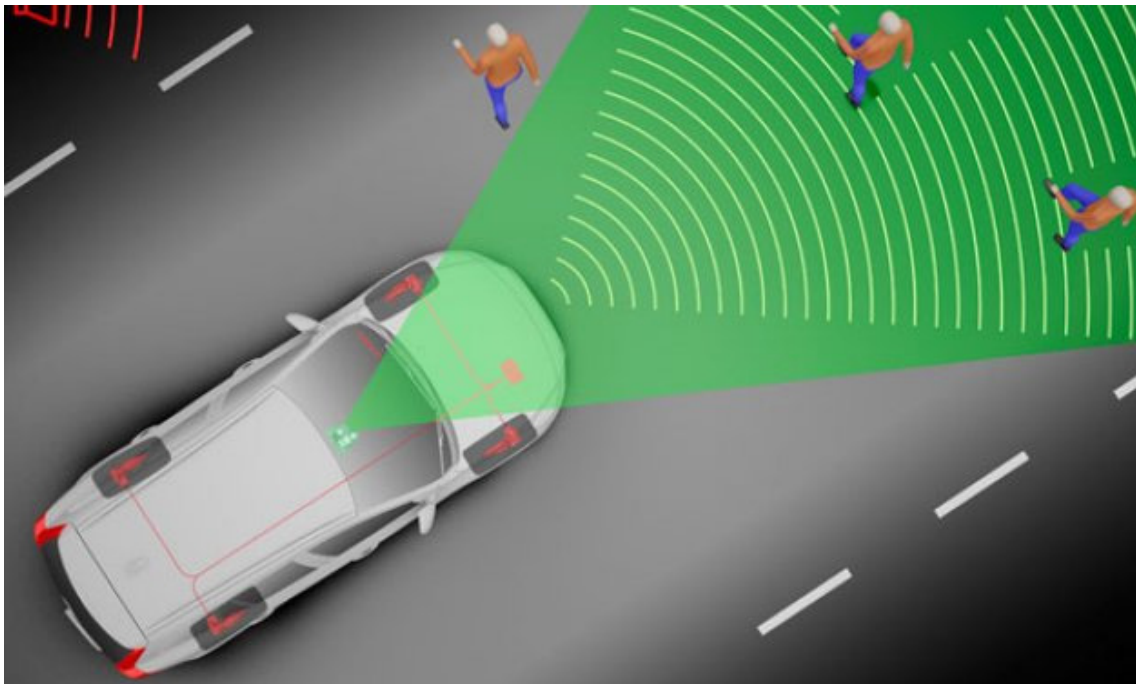


Figura 2.9: Sistema de detección de peatones y usuarios vulnerables de la vía pública [19]

### **2.13-Sistema de reconocimiento de señales de tráfico**

Este sistema analiza las imágenes que es capaz de detectar y reconoce las señales hasta una determinada longitud, y las muestra en el display del conductor. Detecta diferentes tipos de señales pero dota de mayor prioridad a señales tan importantes como el fin de la zona de adelantamiento.

Consta de una cámara, situada entre el parabrisas y el espejo retrovisor interno, y dos procesadores de las imágenes que trabajan con las imágenes que detecta el sistema. Uno de los procesadores está destinado al

reconocimiento de las señales de circulación y otra para detectar las líneas que definen el carril y la calzada. [20]



Figura 2.10: Información del sistema de reconocimiento de señales

### **2.14-Sistemas de control y alerta antisueño**

Los sistemas de control y alerta antisueño pueden detectar la somnolencia del conductor de varias formas: mediante la detección de la expresión facial, los movimientos de las manos y los movimientos de los pies, mediante el análisis del parpadeo y la posición de la cabeza o mediante la detección de las alteraciones del ritmo cardiaco. Esta información, o la combinación de varios factores, se analiza constantemente y el sistema avisa al conductor en caso de somnolencia o distracción. [21]





Figura 2.11: Información del sistema de detección y alerta antisueño

### **2.15-Asistente de intersecciones**

Los accidentes en cruces se producen cuando los conductores realizan maniobras inadecuadas, no prevén las acciones de los demás conductores o no respetan las señales de tráfico.

El asistente en los cruces puede reducir el riesgo mediante dispositivos como los siguientes:

- **Aviso de preferencia:**  
indica al conductor que debe ceder el paso a la derecha; en el panel de control del vehículo aparecen tres niveles de peligro (verde, amarillo y rojo). Si el conductor no reacciona correctamente a la información visual, una señal acústica le avisa de una colisión inminente.
- **Asistente en los semáforos:**  
el semáforo transmite la información al vehículo por vía inalámbrica. El programa de seguridad instalado en el vehículo indica el color del semáforo y sugiere al conductor la velocidad que debe mantener para poder cruzarlo en verde. [22]

### **2.16-Aviso de peligro local**

Los sistemas locales de alerta proporcionan advertencias de proximidad de peligro. Las advertencias de peligro locales se utilizan para aumentar la seguridad y el flujo de tráfico en casos de perturbación, causadas por ejemplo por accidentes, atascos o el mal tiempo.

Los sistemas son operados automáticamente, semi-automáticamente o manualmente desde los centros de control de tráfico basadas en sistemas de vigilancia fijos o sensores móviles.

Los sistemas emplean señales de mensaje variables (VMS) para dar la información a los conductores. Hay tres categorías de VMS basadas en los tipos de mensajes que se dan:

- mensajes reguladores.
- mensajes de advertencia de peligro.
- mensajes informativos. [23]

### **2.17-Aviso inalámbrico de peligro local**

El aviso inalámbrico de peligro local es un sistema de comunicación que amplía el horizonte del conductor y le avisa de forma inteligente de situaciones de peligro en carretera. El programa permite a los conductores adaptar rápidamente la velocidad del vehículo y la distancia de seguridad, por lo que el conductor está mucho más alerta ante posibles situaciones de peligro.

El aviso inalámbrico de peligro local:

- detecta y alerta de obstáculos en carretera y avisa en caso de que el coche propio sea un obstáculo para los demás.
- señala la presencia de vehículos de emergencia o vehículos lentos.
- detecta una menor adherencia o visibilidad debidas al mal tiempo.
- se conecta con balizas electrónicas de señalización de obras u otras zonas de peligro. [24]





Figura 2.12: Información del aviso inalámbrico de peligro local

### **2.18-Luces autoadaptables**

Las luces autoadaptables orientan el haz luminoso a la izquierda, a la derecha, hacia arriba o hacia abajo según el ángulo de dirección de las ruedas, la velocidad y el movimiento del vehículo.

Permite mantener la carretera correctamente iluminada cuando la delantera del vehículo baja debido a una fuerte desaceleración, evita que el haz de luz se eleve cuando el vehículo acelera y, además, la luz se mantiene en la calzada, y no a un lado, al tomar curvas. [25]

### **2.19-Indicador de cambio de marcha (GSI)**

El indicador de cambio de marcha (GSI, *Gear Shift Indicator*) favorece un estilo de conducción conservador que permite ahorrar combustible y conducir de forma más suave y económica.

El GSI avisa visualmente del momento en que se debe cambiar de marcha. El sistema de gestión del motor proporciona toda la información que necesita el GSI. Se trata de un dispositivo sencillo que recuerda a los conductores de vehículos con cambio manual cuándo hay que cambiar a una marcha más larga o más corta. [26]

### **2.20-Alerta de velocidad**

El sistema avisa al conductor con una alarma acústica, visual o táctil cuando la velocidad excede el límite local legalmente establecido.

La información sobre el límite de velocidad se recibe a través de unos transpondedores instalados en las señales de limitación de velocidad o a partir de un mapa digital de carreteras, que para funcionar requiere información de posicionamiento fiable. [27]

### **2.21-Sistema de control de la presión de los neumáticos (TPMS)**

El sistema de control de la presión de los neumáticos (TPMS, *Tyre Pressure Monitoring System*) es un dispositivo electrónico que controla la presión del aire en el interior del neumático. Un sistema TPMS mejora la seguridad del vehículo, ayuda a los conductores a mantener los neumáticos en buen estado y puede contribuir a reducir las emisiones a la atmósfera.

El TPMS directo informa al conductor en tiempo real sobre la presión del neumático. Esta información la recibe mediante un manómetro o simplemente mediante un indicador luminoso de baja presión. El TPMS directo funciona gracias a sensores físicos de presión, dentro de cada neumático, y un sistema para transmitir la información desde el interior del neumático al panel de control o cuadro de instrumentos del coche. El TPMS indirecto mide la presión del aire de forma indirecta, a partir de la velocidad de cada rueda y otras señales del vehículo. [28]

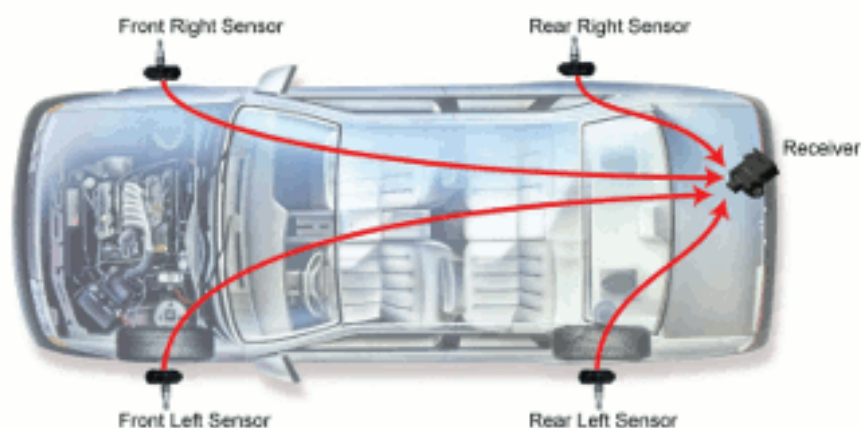


Figura 2.13.: Elementos del TPMS

### **2.22-Sistema paneuropeo de llamada de emergencia en el vehículo (eCall)**

Cuando un coche equipado con eCall tiene un accidente, el dispositivo eCall llama automáticamente al centro de emergencias más cercano y transmite un conjunto de datos. La rapidez con que los servicios de rescate se han movilizan es de suma importancia para salvar vidas o reducir los efectos de las lesiones. eCall puede reducir drásticamente el tiempo de respuesta de los servicios de emergencia.

El sistema eCall integrado establece una conexión de voz a través del número 112 con el centro público de atención de llamadas de urgencia correspondiente (PSAP, *Public Service Answering Point*) y envía datos vitales, como la hora y lugar del accidente y las características del vehículo implicado. La información enviada al PSAP también puede incluir un enlace a un proveedor de servicios, con su dirección IP y número de teléfono. Si el usuario está abonado a un proveedor de servicios, éste también puede enviar información complementaria al PSAP. [29]

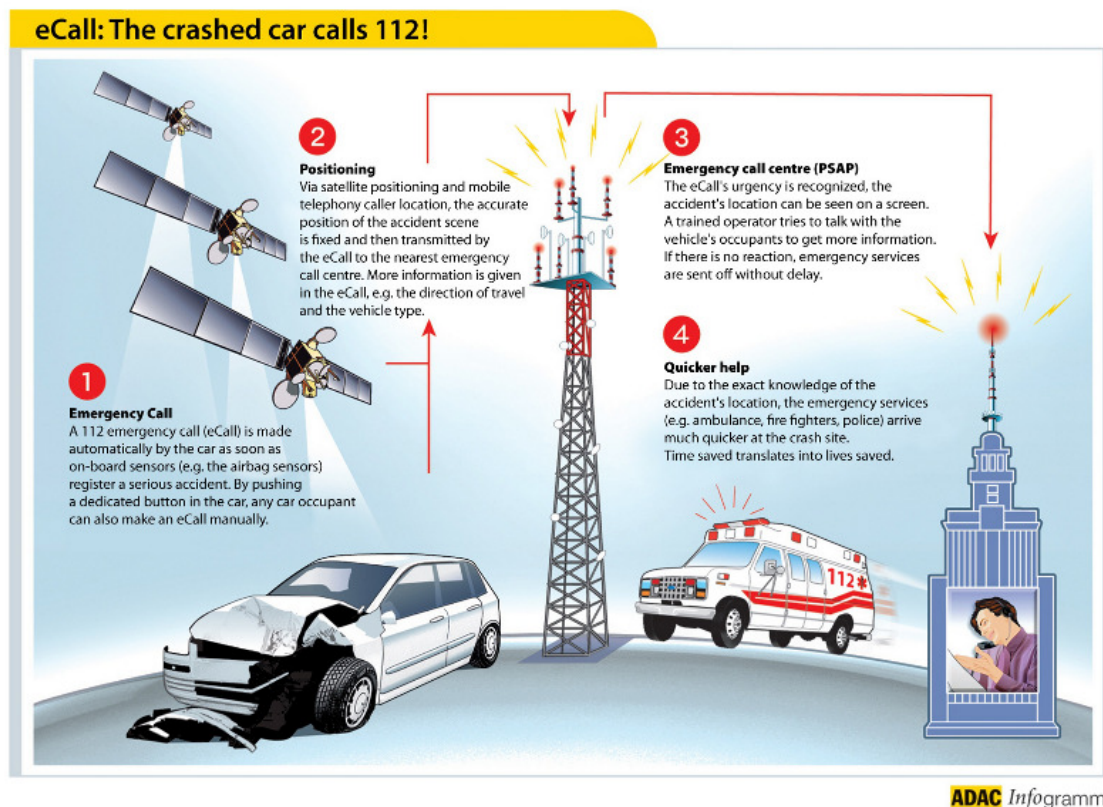


Figura 2.14: Funcionamiento del eCall

### 2.23-Dispositivos de ayuda al aparcamiento

El primero de los dispositivos y, de momento, el más común, son los denominados sensores de aparcamiento. Se pueden situar tanto en la parte delantera como en la parte trasera y los hay de dos tipos:

- Los sensores de ultrasonidos, van incorporados en los paragolpes, son pequeños cilindros del tamaño de una moneda de un Euro incrustados en las defensas. Normalmente son cuatro y funcionan emitiendo ondas de ultrasonidos que rebotan en los obstáculos.
- Los sensores de detección electromagnética, se colocan también en los paragolpes, pero consisten en una tira metálica adherida al interior de este. Su principio de funcionamiento se basa en detección de alteraciones del campo electromagnético producida por los objetos sólidos.

Lo que es común para los dos es la forma en la que nos indican la presencia de obstáculos. En las instalaciones más sencillas, un tono de aviso en forma de pitido nos irá informando de la distancia libre hasta el objeto. La frecuencia del pitido irá en aumento a medida que disminuya la distancia, hasta que cuando nos encontremos a una distancia de unos veinte o treinta centímetros, el pitido será continuo. Otros dispositivos, incorporan leds de tres colores: verde, amarillo y rojo. A medida que nos vayamos acercando al vehículo que se encuentra detrás de nosotros (o delante, pues los dispositivos son tan válidos en un sitio como en el otro), el color ira variando hasta ser rojo cuando estemos a esa distancia de treinta centímetros. [30]



Figura 2.15: Funcionamiento de los sensores de aparcamiento

Si los sensores nos permitían detectar objetos y golpearlos mediante un aviso sonoro, desde hace ya tiempo, algunos modelos incorporan la posibilidad de montar cámaras de visión trasera.



El mecanismo es sencillo: consta de una cámara situada en la parte posterior, que normalmente, se coloca por encima de la matrícula. Cuando introducimos la marcha atrás, se conecta, proyectando la imagen en la pantalla del navegador. [31]



Figura 2.16: Cámaras de visión trasera

Por último, existen también los sistemas de estacionamiento automático. Éstos empiezan a estar disponibles en algunos vehículos y aunque de momento, no pasa de ser sistemas todavía un poco toscos, merecen mención por ir poco a poco introduciéndose en el mercado.

Cuando se quiere realizar el aparcamiento, en línea o en batería, el conductor debe situarse junto al hueco y seleccionar la marcha atrás. Este dispositivo mueve el volante automáticamente para dirigir al coche hacia el hueco. [32]



Figura 2.17: Sistemas de estacionamiento automático

# Capítulo 3

## Descripción de la arquitectura



El presente proyecto ha sido desarrollado en el laboratorio de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid. A continuación se exponen las distintas herramientas utilizadas para la elaboración del trabajo.

### **3.1-Arquitectura hardware**

#### **3.1.1-IVVI 2.0**

IVVI 2.0 es uno de los vehículos desarrollados por el Laboratorio de Sistemas Inteligentes de la Universidad Carlos III. Su nombre viene del acrónimo en inglés de Vehículo Inteligente basado en Información Visual y el número indica que se trata del segundo vehículo en el que han instalado los sensores y equipos necesarios para el desarrollo de Sistemas de Ayuda a la Conducción.

Además de actualizar el equipamiento se ha buscado un diseño más acorde con lo que constituirán los futuros sistema de ayuda. Para ello tanto los ordenadores como los sensores o monitores están perfectamente integrados dentro del vehículo. [33]



Figura 3.1: Fotografía del IVVI 2.0

En el vehículo están instaladas cuatro cámaras en el espectro visible y dos en el infrarrojo. De las primeras, una está supervisando al conductor, vigilando que esté prestando atención a lo que ocurre delante del vehículo y atento a los primeros síntomas de sueño para avisarle. Otras dos cámaras están dedicadas a la detección de peatones y otros vehículos para evitar colisiones. La última cámara captura en color y detecta las señales de tráfico para comprobar que se están cumpliendo las normas y el vehículo no realiza maniobras peligrosas. Las dos cámaras de infrarrojo se encargan de la detección de peatones en condiciones de baja visibilidad. [33]



Figura 3.2: Ubicación de las cámaras en el IVVI 2.0

La información proveniente de los Sistemas de Ayuda a la Conducción solo se le comunica al conductor cuando el vehículo se encuentra en una situación real de peligro. Se evita así distraer al conductor con información inútil o redundante que solo sirva para distraerle de su tarea y suponga un peligro o un estorbo más que una ayuda.

Existen dos formas de hacer llegar esa información: a través de una señal sonora se le avisa del peligro y de la maniobra que debe realizar y a través de una pantalla que se encuentra integrada en el salpicadero se le muestra la información captada y analizada por los sensores. [33]



Figura 3.3: Ubicación de la pantalla en el IVI 2.0

Para determinar el estado del vehículo se dispone de una sonda CAN-Bus que obtiene información del funcionamiento del vehículo así como de un sistema GPS-IMU que da la información de la posición y velocidad del vehículo. Tres ordenadores situados en el maletero analizan la información sensorial. Al estar conectados en red pueden intercambiar información de sus respectivos módulos. [33]



Figura 3.4: Ubicación de los ordenadores en el IVVI 2.0

### 3.1.2-Cámara de visión estéreo

La cámara utilizada para captar las imágenes en tiempo real que procesará la aplicación es la cámara de visión “Bumblebee®2”, cuyas características son las siguientes:

- Resolución: 640 x 480 Píxeles
- Velocidad de captura en vídeo digital: 48 fps
- Calibración: Precalibrado hasta 0,1 píxeles RMS de error
- Línea de base: 12 cm
- Campo de visión (horizontal): 97°
- Distancia focal: 2,5 mm
- Sincronización: Automática
- Potencia: 12VDC, 2.5W



Figura 3.5: Cámara de visión estéreo “Bumblebee®2” [34]

### 3.1.3-Alimentación

El sistema de alimentación está compuesto por una batería de automóvil, de 12V y de un sistema transformador de corriente alterna a continua de 1000W de potencia, unidos mediante un relé.

### 3.1.4-Pantalla de visualización

Los resultados de la aplicación son visualizados por una pantalla táctil “Xenarc 7 pulgadas 705YV”. Las características del producto son las siguientes:

- Tamaño de pantalla: 7"
- Formato: 16:9
- Angulo de visión H.: 140°
- Angulo de visión V.: 120°
- Resolución física: WVGA 800 x 480
- Resolución soportada: 640 x 480, 800 x 600 ~ 1024 x 768
- Rango operativo del voltaje: DC 9V ~ 30V
- Alimentación: DC 12V
- Consumo: < 5W
- Ancho: 19,38cm.
- Alto: 12,40cm.
- Fondo: 2,9cm.
- Peso: 522gr.



Figura 3.6: Pantalla Xenarc 7'' 705YV [35]

## **3.2-Arquitectura software**

### **3.2.1-Microsoft Visual Studio 2008**

Microsoft Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) para sistemas operativos Windows. Soporta varios lenguajes de programación tales como Visual C++, Visual C#, Visual J#, y Visual Basic, al igual que entornos de desarrollo web como ASP.NET, aunque actualmente se han desarrollado las extensiones necesarias para muchos otros.

Visual Studio permite a los desarrolladores crear aplicaciones, sitios y aplicaciones web, así como servicios web en cualquier entorno que soporte la plataforma .NET (a partir de la versión .NET 2002). Así se pueden crear aplicaciones que se intercomunican entre estaciones de trabajo, páginas web y dispositivos móviles.

Visual Studio 2008 fue publicado (RTM) el 17 de noviembre de 2007 en inglés, mientras que la versión en castellano no fue publicada hasta el 2 de febrero de 2008.

El nuevo framework (.NET 3.5) está diseñado para aprovechar las ventajas que ofrece el nuevo sistema operativo *Windows Vista* a través de sus subsistemas *Windows Communication Foundation* (WCF) y *Windows Presentation Foundation* (WPF). El primero tiene como objetivo la construcción de aplicaciones orientadas a servicios, mientras que el último apunta a la creación de interfaces de usuario más dinámicas que las conocidas hasta el momento.

A las mejoras de desempeño, escalabilidad y seguridad con respecto a la versión anterior, se agregan, entre otras, las siguientes novedades:

- La mejora en las capacidades de pruebas unitarias permiten ejecutarlas más rápido independientemente de si lo hacen en el entorno IDE o desde la línea de comandos. Se incluye además un nuevo soporte para diagnosticar y optimizar el sistema a través de las herramientas de pruebas de Visual Studio. Con ellas se podrán ejecutar perfiles durante las pruebas para que ejecuten cargas, prueben procedimientos contra un sistema y registren su comportamiento, y utilizar herramientas integradas para depurar y optimizar.
- Con Visual Studio Tools for Office (VSTO) integrado con Visual Studio 2008 es posible desarrollar rápidamente aplicaciones de alta calidad basadas en la interfaz de usuario (UI) de Office que personalicen la experiencia del usuario y mejoren su productividad en el uso de Word, Excel, PowerPoint, Outlook, Visio, InfoPath y Project. Una completa compatibilidad para implementación con ClickOnce garantiza el entorno ideal para una fácil instalación y mantenimiento de las soluciones Office.
- Visual Studio 2008 permite incorporar características del nuevo Windows Presentation Foundation sin dificultad tanto en los formularios de Windows existentes como en los nuevos. Ahora es posible actualizar el estilo visual de las aplicaciones al de Windows Vista debido a las mejoras en Microsoft Foundation Class Library (MFC) y Visual C++. Visual Studio 2008 permite mejorar la interoperabilidad entre código nativo y código manejado por .NET.

Esta integración más profunda simplificará el trabajo de diseño y codificación.

- LINQ (Language Integrated Query) es un nuevo conjunto de herramientas diseñado para reducir la complejidad del acceso a bases de datos a través de extensiones para C++ y Visual Basic, así como para Microsoft .NET Framework. Permite filtrar, enumerar, y crear proyecciones de muchos tipos y colecciones de datos utilizando todos la misma sintaxis, prescindiendo del uso de lenguajes especializados.
- Visual Studio 2008 ahora permite la creación de soluciones multiplataforma adaptadas para funcionar con las diferentes versiones de .NET Framework: 2.0 (incluido con Visual Studio 2005), 3.0 (incluido en Windows Vista) y 3.5 (incluido con Visual Studio 2008).
- .NET Framework 3.5 incluye la biblioteca ASP.NET AJAX para desarrollar aplicaciones web más eficientes, interactivas y altamente personalizadas que funcionen para todos los navegadores más populares y utilicen las últimas tecnologías y herramientas Web, incluyendo Silverlight y Popfly. [36]

### 3.2.2-Librería de tratamiento de imagen OpenCV 2.3.1

OpenCV es una biblioteca libre de visión artificial originalmente desarrollada por Intel. Desde que apareció su primera versión alfa en el mes de enero de 1999, se ha utilizado en infinidad de aplicaciones. Desde sistemas de seguridad con detección de movimiento, hasta aplicativos de control de procesos donde se requiere reconocimiento de objetos. Esto se debe a que su publicación se da bajo licencia BSD, que permite que sea usada libremente para propósitos comerciales y de investigación con las condiciones en ella expresadas.



Open CV es multiplataforma, existiendo versiones para GNU/Linux, Mac OS X y Windows. Contiene más de 500 funciones que abarcan una gran gama de áreas en el proceso de visión, como reconocimiento de objetos (reconocimiento facial), calibración de cámaras, visión estéreo y visión robótica. [37]

La versión utilizada para el desarrollo del trabajo es la versión 2.3.1.

# **Capítulo 4**

## **Sistema propuesto**

En este capítulo, se explican los pasos realizados para la elaboración del trabajo, desde el planteamiento inicial hasta llegar a la solución final, pasando por todas las modificaciones intermedias.

#### **4.1-Identificación de la región a analizar**

Inicialmente, se dispone de una secuencia de imágenes captadas por la cámara situada en el interior del vehículo, que muestran en tiempo real una panorámica de la vía por la que se circula. Dichas imágenes tienen un tamaño de 640 píxeles de ancho por 480 píxeles de alto. El primer paso es identificar la región de interés, o zona de la imagen donde se producirán los adelantamientos, la cual será analizada por nuestra aplicación. Dicha zona estará situada a la izquierda de la imagen, a una altura media, y el tamaño elegido para la región será de 275x275 píxeles.

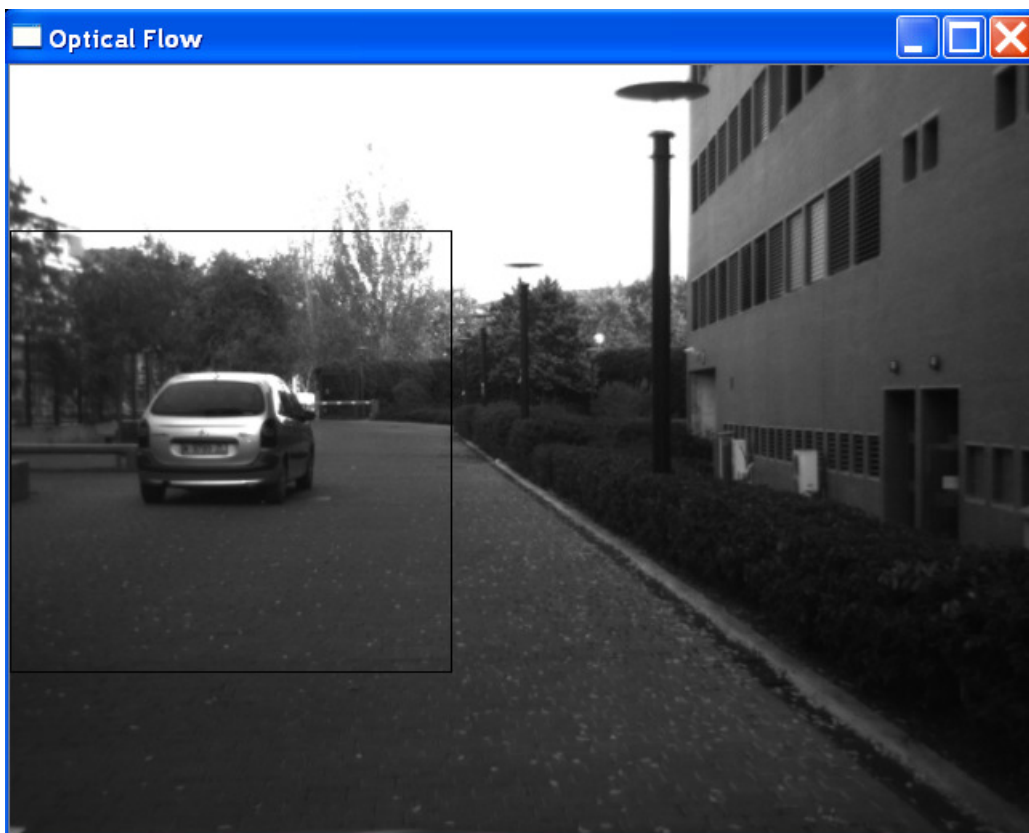


Figura 4.1: Región de interés a analizar

## **4.2-Detección de movimiento**

El siguiente paso será analizar hacia dónde se produce el movimiento en la región de interés. Para ello, se dispone del algoritmo de detección y seguimiento de movimiento diseñado por Lucas y Kanade, que tiene como objetivo encontrar los puntos que serán encontrados más fácilmente en imágenes posteriores de vídeo, como las esquinas. Estos puntos en esencia significan la presencia de una textura o un borde en dos direcciones centrado a ese punto. El seguimiento de estos puntos hace que el algoritmo no dependa de la forma de los puntos a seguir, sino de la presencia de estos puntos en la imagen, que intentan garantizar la presencia de objetos sin la necesidad de detectarlos.

En la implementación se utilizarán las funciones *cvGoodFeaturesToTrack*, que calcula los *eigenvalores* de cada píxel y tiene como resultado un arreglo de puntos donde se encuentran los mayores *eigenvalores*, que son puntos óptimos a ser seguidos, y *cvCalcOpticalFlowPyrLK*, que implementa el algoritmo de Lucas-Kanade de manera piramidal, que busca ampliar la ventana local entre imágenes para poder referenciar el punto a seguir. En esta implementación se realiza el cálculo de los puntos a ser seguidos, mostrando la manera de cómo se mueven estos puntos a medida que se mueven los objetos en la imagen. [38]

Para una mejor visualización, en nuestra aplicación se han seguido 50 puntos, comparando la imagen actual con la imagen inmediatamente anterior y se han dibujado flechas en la imagen actual indicando la dirección y el sentido del movimiento, como se puede apreciar en la figura 4.2.



Figura 4.2: Análisis del movimiento en la región de interés

Se puede observar que el algoritmo presenta la trayectoria de los puntos de interés, pero hay puntos que cumplen con las propiedades de puntos de interés que no pertenecen a los objetos móviles.

#### **4.3-Determinación de la posibilidad de adelantamiento en base a las características del movimiento**

El siguiente paso es detectar cuándo hay un posible vehículo adelantando. Para ello, se plantearon 2 hipótesis:

-habrá un determinado número de flechas con un valor de módulo o longitud alto.

-habrá un determinado número de flechas en el primer cuadrante (que formen un ángulo con respecto a la horizontal de entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ).

Ambas hipótesis se comprobaron obteniendo el valor del módulo y el ángulo de las flechas en diferentes instantes. Se expone un ejemplo de los valores de módulo y ángulo en diferentes situaciones en el Anexo 1.

Finalmente, tras multitud de pruebas, se tomó la decisión de establecer la “posibilidad de vehículo adelantando” cuando había 3 o más puntos de interés en los que el módulo de las flechas era mayor que 5 y el ángulo que formaban con la horizontal (tomando como  $0^\circ$  la flecha horizontal hacia la izquierda y como  $180^\circ$  la flecha horizontal hacia la derecha) estaba comprendido entre 2,75 y 3,15.

#### **4.4-Detección de la presencia de vehículos en la imagen**

El algoritmo utilizado hasta el momento sólo determinaba cuándo se producía movimiento en la dirección y sentido deseados, no cuándo estábamos siendo adelantados. Por ejemplo, cuando el coche giraba a la izquierda, la detección por parte del algoritmo era positiva, aunque no hubiera ningún coche a su alrededor, tal y como se puede ver en la figura 4.3 (la detección positiva se señala con un círculo negro en la parte superior izquierda de la imagen).



Figura 4.3: Detección de posible vehículo adelantando

Por este motivo, se hacía necesaria la presencia de un segundo algoritmo que determinara cuándo se encontraba un coche en la región de interés. Este algoritmo es el *Haar-like* en cascada. Dicho algoritmo fue inicialmente propuesto por Paul Viola y mejorado por Rainer Lienhart. El algoritmo (o clasificador) en cuestión ha sido entrenado con cientos de imágenes de muestra de un objeto en particular (un coche o una cara) llamados ejemplos positivos, que son escalados al mismo tamaño (por ejemplo 200x200), y cientos de imágenes arbitrarias del mismo tamaño, o ejemplos negativos. El clasificador puede ser aplicado a una región de interés e una imagen de entrada y genera un “1” si es probable que la región contenga el objeto (la cara o el coche) y un “0” en caso contrario.

La palabra “cascada” significa que el clasificador resultante consiste en varios clasificadores más simples (etapas) que son aplicados subsiguientemente a la región de interés hasta que en alguna etapa el candidato es rechazado o se pasaron todas las etapas.

Las características *Haar-like* son la entrada para los clasificadores básicos. El algoritmo usa las siguientes características:

- a) características de borde (edge features)
- b) características de línea (line features)
- c) características de centro y alrededores (center-surround features)

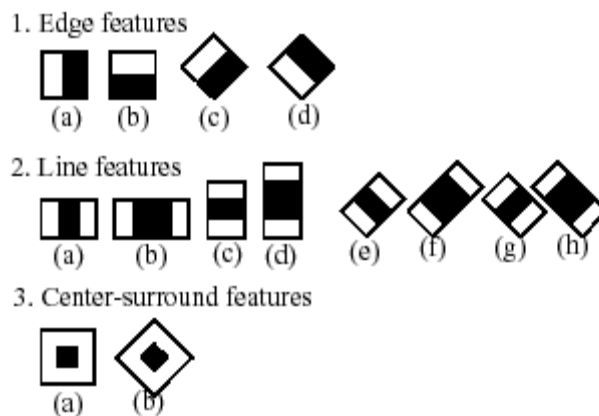


Figura 4.4: Características usadas por el algoritmo Haar-like en cascada

En la implementación se utilizarán las funciones *cvLoadHaarClassifierCascade*, que carga una cascada de clasificadores entrenados de un archivo o base de datos integrado en OpenCV, y *cvHaarDetectObjects*, que detecta los objetos en la imagen, mediante la búsqueda de secciones rectangulares en la imagen, que serán candidatas a contener el objeto, y el análisis de las mismas en diferentes escalas. [39]

#### **4.5-Preprocesado de imágenes**

Una vez aplicado el nuevo algoritmo, surgía un nuevo problema. Se trataba de que si los dos algoritmos daban resultado positivo, significaba que se estaba produciendo un adelantamiento, y si uno o los dos algoritmos daba resultado negativo, es que no se estaba produciendo



ningún adelantamiento. Pero el sistema no funcionaba correctamente, había muchos adelantamientos que no eran detectados. Para corregir este problema se propusieron 3 soluciones:

- modificar el tamaño de la región de búsqueda (región de interés).
- modificar el número de características a encontrar en la región de interés.
- hacer un preprocesado de las imágenes antes de ser analizadas.

Con las dos primeras soluciones no se lograba una gran mejoría, pero con la última sí que se obtenían resultados interesantes. Se trataba de encontrar una combinación de brillo y contraste que permitiera detectar el 100% de los coches.



Figura 4.5: Imagen preprocesada

OpenCV ofrece la posibilidad de realizar este preprocesado de las imágenes. Un operador de procesamiento de imágenes general es una función

que toma una o más imágenes de entrada y produce una imagen de salida. Las transformaciones de imágenes pueden ser vistas como:

- operadores de punto (transformaciones de píxel).
- operadores zonales.

En las transformaciones de píxel, el valor de cada píxel de salida depende sólo del correspondiente valor del píxel de entrada. Ejemplos de estos operadores incluyen los ajustes de brillo y contraste, así como la corrección de color y transformaciones.

Dos procesos de transformaciones de punto muy utilizados son la multiplicación y adición con una constante:

$$g(x) = \alpha f(x) + \beta$$

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  son comúnmente llamados ganancia y sesgo. En este caso, serán llamados a controlar el brillo y el contraste respectivamente. Se debe pensar entonces en  $f(x)$  como los píxeles de la imagen origen y en  $g(x)$  como los píxeles de la imagen de salida. Luego, más convenientemente, se puede escribir la expresión como

$$g(i, j) = \alpha \cdot f(i, j) + \beta ,$$

donde  $i$  y  $j$  indican que el píxel se encuentra en la  $i$ -ésima fila y la  $j$ -ésima columna. [40]

Tras multitud de intentos, se llegó a la conclusión de que no existía ninguna combinación de brillo y contraste que permitiera detectar el 100% de los coches. El problema era el siguiente: combinaciones de brillo alto y contraste alto permitían detectar los coches oscuros y de tonalidad intermedia, pero no los coches claros. Del mismo modo, combinaciones de brillo bajo y contraste alto permitían detectar los coches claros y algunos de tonalidad intermedia, pero no los oscuros. Por lo tanto, se tomó la solución de utilizar el algoritmo de detección de objetos en ambas imágenes: la imagen con brillo y contraste altos ( $\alpha=1$  y  $\beta=5$ ) y la imagen con brillo bajo y contraste alto ( $\alpha=6$  y  $\beta=5$ ).

En definitiva, el diagrama de flujo del programa quedaba de la siguiente manera:

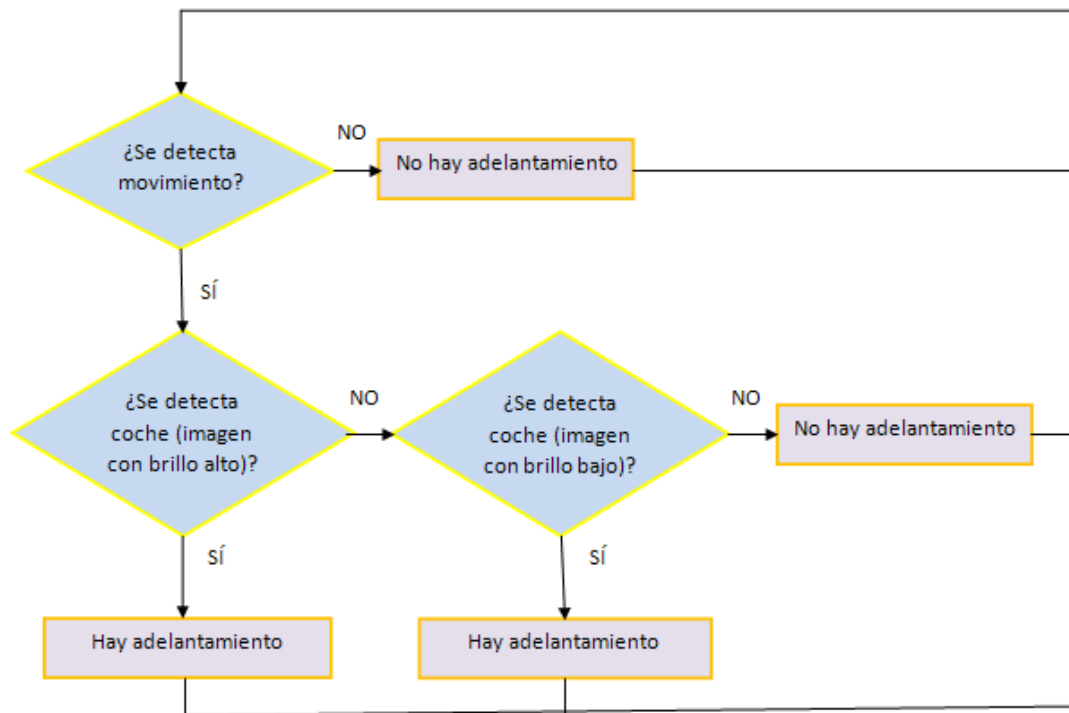


Figura 4.6: Diagrama de flujo del programa

#### **4.6-Seguimiento de vehículos**

La aplicación ya funciona bastante bien, pero sigue habiendo dos grandes problemas:

- se detectan muchos falsos positivos.
- la detección de adelantamientos es muy intermitente.

Para solucionar estos problemas, hay que recurrir a técnicas de seguimiento, utilizando la información previa en cada instante. Se observa que en muy escasas ocasiones se producen errores en dos instantes consecutivos. Por todo ello, se proponen dos soluciones:

- a) Para eliminar los falsos positivos:

Se propone crear un contador para determinar que se está produciendo adelantamiento sólo cuando se reciben 2 positivos consecutivos. El diagrama de flujo quedaría de la siguiente manera:

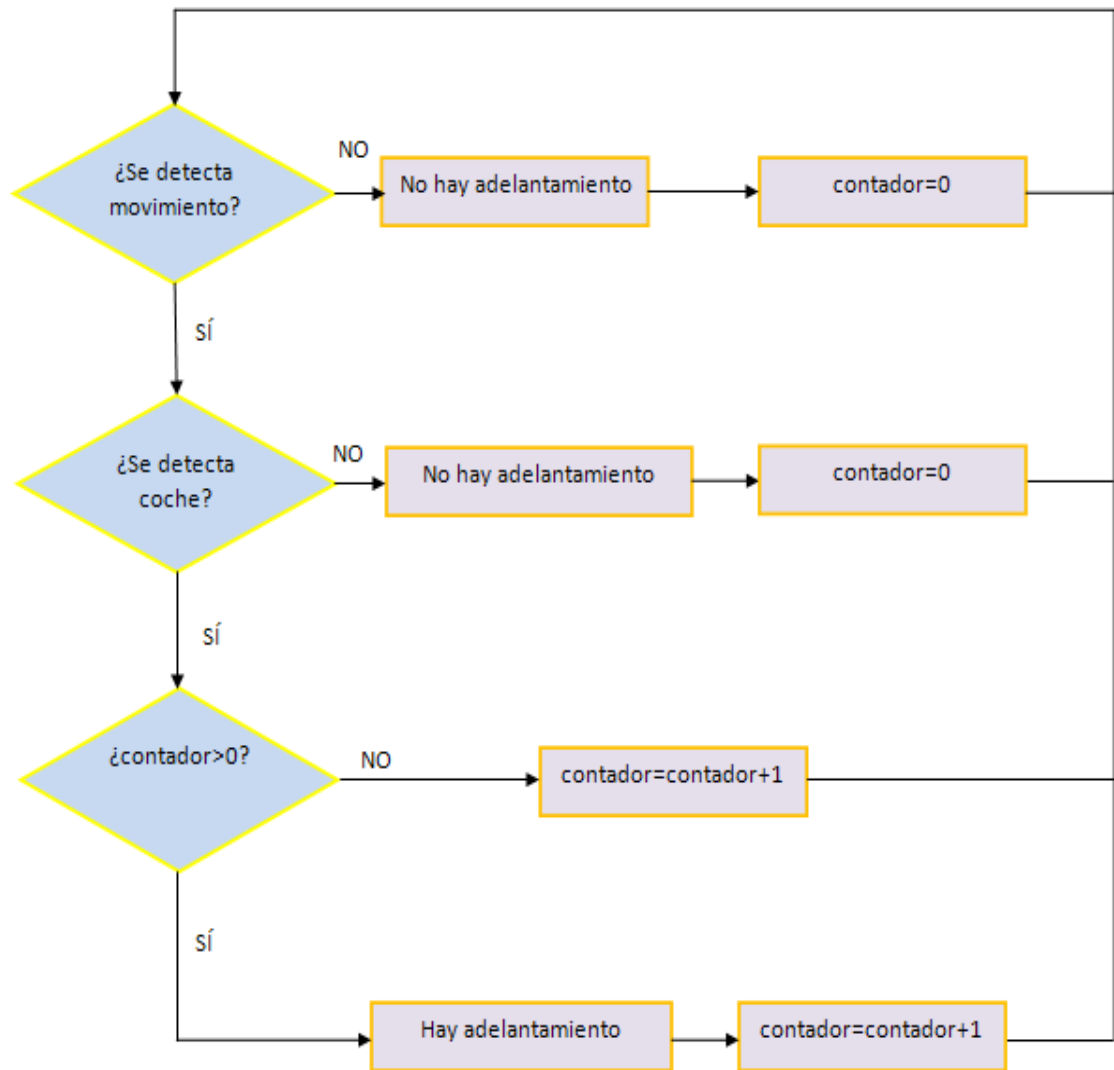


Figura 4.7: Flujograma para la eliminación de falsos positivos

b) Para eliminar la detección intermitente:

Se propone crear un contador para determinar que un positivo se conserve durante 15 instantes consecutivos. El diagrama de flujo quedaría de la siguiente manera:

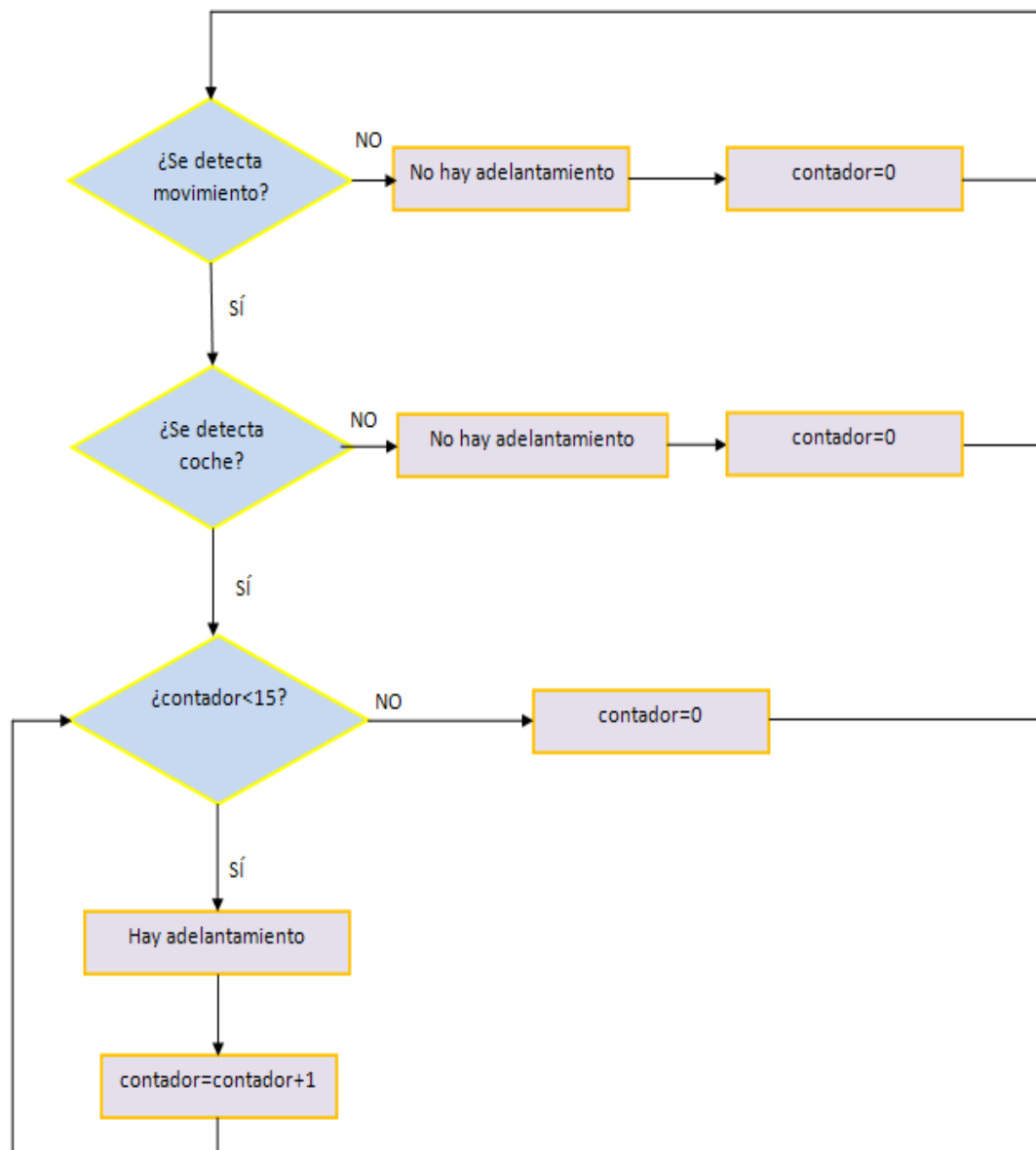


Figura 4.8: Flujograma para la eliminación de la detección intermitente

La solución a) eliminaba la gran mayoría de los falsos positivos, pero tenía el inconveniente de que la detección seguía siendo intermitente, mientras que la solución b) eliminaba casi por completo la detección intermitente, pero seguía estando el problema de los falsos positivos. Por lo tanto, se decidió adoptar una solución intermedia: utilizando un contador, determinar que hay un vehículo adelantando cuando se han producido 2 positivos seguidos y mantener esa afirmación durante 15 instantes seguidos. El flujograma final quedaría así:

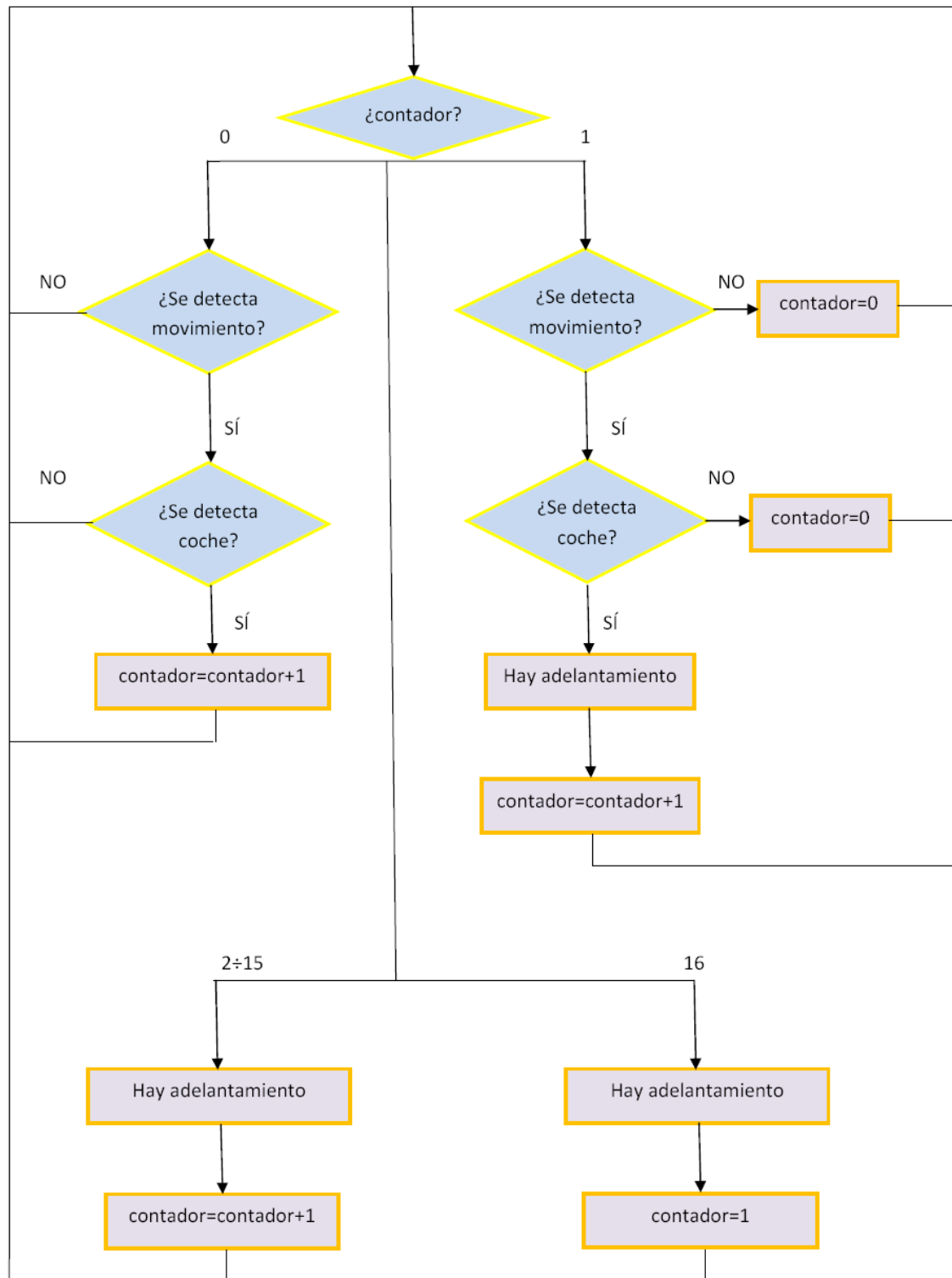


Figura 4.9: Flujograma final

# **Capítulo 5**

## **Resultados, conclusiones y trabajos futuros**

Para probar la aplicación se realizaron una serie de pruebas en distintas vías. No se encontraron grandes diferencias entre las pruebas en autopistas y autovías y las pruebas en carreteras convencionales, pero sí hubo más diferencias en las pruebas en vía urbana.

En autopistas, autovías y carreteras convencionales, el funcionamiento de la aplicación era realmente bueno: la detección de adelantamientos era de un 99%, mientras que el porcentaje de falsos positivos era ciertamente escaso.

En vías urbanas, el funcionamiento de la aplicación no era tan bueno, ya que, aunque el porcentaje de adelantamientos detectados estaba en torno al 98%, el número de falsos positivos era mayor.

En cualquier caso, el principal objetivo de la aplicación era evitar los accidentes por salida de vía y colisión lateral, los cuales se producían principalmente en carreteras convencionales, por lo que la aplicación es realmente útil para el objetivo para la cual se ha diseñado.

Como trabajos futuros, es posible conseguir una mejora de la aplicación añadiendo algún otro algoritmo de detección o algún otro sensor en el vehículo. Por ejemplo, la incorporación de un telémetro láser o una cámara infrarroja podría ayudar a evitar la gran mayoría de falsos positivos que se producen actualmente. También sería posible detectar la distancia a la que se encuentran los vehículos, mediante la incorporación de un sistema de radar.

Otra posible aplicación podría detectar también peatones, ciclistas, ciclomotores, motocicletas y otros usuarios de la vía.



# Capítulo 6

## Presupuesto

### **6.1-Coste de material**

En este apartado se incluyen los materiales utilizados para la elaboración del proyecto.

| Concepto                                 | Cantidad | Coste Unitario | Coste total |
|--|----------|----------------|-------------|
| Cámara Web Logitech QuickCam Express OEM | 1 ud.    | 1485,41        | 1485,41     |
| Pantalla Xenarc 7" 705YV                 | 1 ud.    | 233,37 €       | 233,37 €    |
| Portátil ASUS U30SD-RX137V               | 1 ud.    | 705,58 €       | 705,58 €    |
| Conversor serie USB                      | 1 ud.    | 14,75 €        | 14,75 €     |
| Microsoft Visual Studio 2008             | 1 ud.    | 250,00 €       | 250,00 €    |
| TOTAL                                    |          |                | 2.689,11 €  |

### **6.2-Coste de personal**

En este apartado se incluye el coste del personal involucrado en la elaboración del proyecto, durante el desarrollo del mismo.

| Concepto                     | Cantidad | Coste Unitario | Coste total |
|------------------------------|----------|----------------|-------------|
| Ingeniero Técnico Industrial | 10 meses | 1800 €/mes     | 18.000 €    |
| TOTAL                        |          |                | 18.000,00 € |

### **6.3-Presupuesto total**

El presupuesto total incluye el coste de material más el coste de personal del proyecto, y quedaría de la siguiente manera:

| Concepto          | Importe     |
|-------------------|-------------|
| Coste de material | 2.689,11 €  |
| Coste de personal | 18.000,00 € |
| TOTAL             | 20.689,11 € |

El presupuesto final del proyecto asciende a la cantidad de: VEINTE MIL SEISCIENTOS OCHENTA Y NUEVE EUROS CON ONCE CÉNTIMOS.

# Capítulo 7

## Bibliografía

- [1] Wikipedia®. (2012). *Anexo:Países por vehículos per cápita*. Consultada el 7 de agosto de 2012, en [http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Pa%C3%ADses\\_por\\_veh%C3%ADculos\\_per\\_c%C3%A1pita](http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Pa%C3%ADses_por_veh%C3%ADculos_per_c%C3%A1pita)
- [2] Dirección General de Tráfico. (2012). *Parque Nacional de Vehículos*. Consultada el 7 de agosto de 2012, en [http://www.dgt.es/was6/portal/contenidos/documentos/seguridad\\_vial/estadistica/parque\\_vehiculos/series\\_historicas\\_parque/series\\_historicas\\_parque\\_vehiculos.pdf](http://www.dgt.es/was6/portal/contenidos/documentos/seguridad_vial/estadistica/parque_vehiculos/series_historicas_parque/series_historicas_parque_vehiculos.pdf)
- [3] Dirección General de Tráfico. (2011). *Las principales cifras de la Siniestralidad Vial España 2010*. Consultada el 7 de agosto de 2012 en [http://www.dgt.es/was6/portal/contenidos/es/seguridad\\_vial/estadistica/publicaciones/princip\\_cifras\\_siniestral/cifras\\_siniestralidadl011.pdf](http://www.dgt.es/was6/portal/contenidos/es/seguridad_vial/estadistica/publicaciones/princip_cifras_siniestral/cifras_siniestralidadl011.pdf)
- [4] Wikiapuntes©. (2009). *Sistemas de ayuda a la conducción*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en <http://www.wikiteka.com/trabajos/sistemas-de-ayuda-a-la-conduccion/>
- [5] Wikipedia®. (2012). *Sistema antibloqueo de ruedas*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en [http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_antibloqueo\\_de\\_ruedas](http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_antibloqueo_de_ruedas)
- [6] <http://decabo.com/automovilismo-y-motor/2007/12/08/fundamentos-principales-y-funcionamiento-del-abs/>
- [7] Wikipedia®. (2012). *Control de estabilidad*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en [http://es.wikipedia.org/wiki/Control\\_de\\_estabilidad](http://es.wikipedia.org/wiki/Control_de_estabilidad)

- [8] <http://www.bolido.com/2011/06/que-es-el-control-de-estabilidad-o-esp/20070605195406-esp1/>
- [9] Capreolus. (2012). *¿Qué es el BAS?*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en <http://www.circulaseguro.com/seguridad-activa/que-es-el-bas>
- [10] Admin. (2010). *Distribución Electrónica de Frenado (EBD)*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en <http://www.autosmoviles.com/distribucion-electronica-de-frenado-ebd/>
- [11] Wikipedia®. (2012). *Control de tracción*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en [http://es.wikipedia.org/wiki/Control\\_de\\_tracci%C3%B3n](http://es.wikipedia.org/wiki/Control_de_tracci%C3%B3n)
- [12] Redacción coches.com. (2009). *¿Qué es el control de velocidad adaptativo?*. Consultada el 15 de agosto de 2012, en <http://noticias.coches.com/noticias-motor/que-es-el-control-de-velocidad-adaptativo/3833>
- [13] Capreolus. (2012). *¿Qué es el limitador de velocidad?*. Consultada el 15 de agosto de 2012, en <http://www.circulaseguro.com/seguridad-activa/que-es-el-limitador-de-velocidad>
- [14] Óscar Cisneros. (2009). *El sistema de detección de ángulos muertos y asistencia para cambio de carril*. Consultada el 15 de agosto de 2012, en [http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala\\_prensa/revista\\_tecnica/hemeroteca/articulos/R40\\_A6.pdf](http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R40_A6.pdf)

- [15] Óscar Cisneros. (2008). *El sistema de alerta de cambio involuntario de carril (LDW, Lane Departure Warning)*. Consultada el 15 de agosto de 2012, en [http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala\\_prensa/revista\\_tecnica/hemeroteca/articulos/R36\\_A6.pdf](http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R36_A6.pdf)
- [16] Óscar Cisneros. (2008). *El sistema de visión nocturna*. Consultada el 15 de agosto de 2012, en [http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala\\_prensa/revista\\_tecnica/hemeroteca/articulos/R37\\_A7.pdf](http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R37_A7.pdf)
- [17] European Comission Information Society. (2011). *Sistema de Aviso de Obstáculos o de Colisión*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en [http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/intelligentcar/smart\\_cars\\_technologies/cooperativesyst/obstaclecollisionwarning/index\\_es.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/smart_cars_technologies/cooperativesyst/obstaclecollisionwarning/index_es.htm)
- [18] European Comission Information Society. (2011). *Protección de Peatones y Usuarios Vulnerables de la Vía Pública*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en [http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/intelligentcar/smart\\_cars\\_technologies/driverassit/pedestrianvulnerable/index\\_es.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/smart_cars_technologies/driverassit/pedestrianvulnerable/index_es.htm)
- [19] <http://www.autobild.es/galerias/galeria-volvo-presenta-el-nuevo-v60-el-primer-sport-wagon-de-la-marca-sueca>
- [20] Óscar Miguel. (2008). *Sistema de detección de señales y de salida de carril para el Insignia: Opel Eye*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en <http://www.diarimotor.com/2008/06/19/sistema-de-deteccion-de-senales-y-de-salida-de-carril-para-el-opel-insignia/>

- [21] European Comission Information Society. (2011). *Sistemas de control y alerta antisueño*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en [http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/intelligentcar/smart\\_cars\\_technologies/driverassist/driverdrowwarning/index\\_es.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/smart_cars_technologies/driverassist/driverdrowwarning/index_es.htm)
- [22] European Comission Information Society. (2011). *Asistente en Los Cruces*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en [http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/intelligentcar/smart\\_cars\\_technologies/cooperativesyst/intersectionassist/index\\_es.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/smart_cars_technologies/cooperativesyst/intersectionassist/index_es.htm)
- [23] European Comission Information Society. (2011). *Aviso de Peligro Local*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en [http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/intelligentcar/smart\\_cars\\_technologies/cooperativesyst/locdangwarning/index\\_es.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/smart_cars_technologies/cooperativesyst/locdangwarning/index_es.htm)
- [24] European Comission Information Society. (2011). *Aviso Inalámbrico de Peligro Local*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en [http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/intelligentcar/smart\\_cars\\_technologies/cooperativesyst/wirelesslocdangwarn/index\\_es.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/smart_cars_technologies/cooperativesyst/wirelesslocdangwarn/index_es.htm)
- [25] European Comission Information Society. (2011). *Luces Autoadaptables*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en [http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/intelligentcar/smart\\_cars\\_technologies/driverassist/adaptiveheadlights/index\\_es.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/smart_cars_technologies/driverassist/adaptiveheadlights/index_es.htm)
- [26] European Comission Information Society. (2011). *Indicador de Cambio de Marcha*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en [http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/intelligentcar/smart\\_cars\\_technologies/driverassist/gearshiftindic/index\\_es.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/smart_cars_technologies/driverassist/gearshiftindic/index_es.htm)



[27] European Comission Information Society. (2011). *Alerta de velocidad*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en [http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/intelligentcar/smart\\_cars\\_technologies/driverassist/speedalert/index\\_es.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/smart_cars_technologies/driverassist/speedalert/index_es.htm)

[28] European Comission Information Society. (2011). *Sistema de Control de la Presión de los Neumáticos - TPMS*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en [http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/intelligentcar/smart\\_cars\\_technologies/driverassist/tyrepressure/index\\_es.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/smart_cars_technologies/driverassist/tyrepressure/index_es.htm)

[29] European Comission Information Society. (2011). *eCall S. O. S. Accidente de Tráfico*. Consultada el 14 de agosto de 2012, en [http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/intelligentcar/smart\\_cars\\_technologies/locationbasedsyst/ecall/index\\_es.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/smart_cars_technologies/locationbasedsyst/ecall/index_es.htm)

[30] Morrillu. (2008). *Dispositivos de ayuda al aparcamiento (1/3)*. Consultada el 15 de agosto de 2012, en <http://www.circulaseguro.com/seguridad-activa/dispositivos-de-ayuda-al-aparcamiento-13>

[31] Morrillu. (2008). *Dispositivos de ayuda al aparcamiento (1/3)*. Consultada el 15 de agosto de 2012, en <http://www.circulaseguro.com/seguridad-activa/dispositivos-de-ayuda-al-aparcamiento-23>

[32] Morrillu. (2008). *Dispositivos de ayuda al aparcamiento (1/3)*. Consultada el 15 de agosto de 2012, en <http://www.circulaseguro.com/seguridad-activa/dispositivos-de-ayuda-al-aparcamiento-33>

[33] Universidad Carlos III de Madrid. (2010). *IvvI-2.0*. Consultada el 16 de agosto de 2012, en [http://www.uc3m.es/portal/page/portal/dpto\\_ing\\_sistemas\\_automatica/investigacion/lab\\_sist\\_inteligentes/sis\\_int\\_transporte/vehiculos/IvvI20/](http://www.uc3m.es/portal/page/portal/dpto_ing_sistemas_automatica/investigacion/lab_sist_inteligentes/sis_int_transporte/vehiculos/IvvI20/)

[34] <http://www.mobilerobots.com/accessories/bumblebeestereo.aspx>

[35] <http://www.bittopia.com/b2c/producto/3163/1/xenarc-705yv-pantalla-7->

[36] Wikipedia®. (2012). *Microsoft Visual Studio*. Consultada el 16 de agosto de 2012, en [http://es.wikipedia.org/wiki/Microsoft\\_Visual\\_Studio](http://es.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Visual_Studio)

[37] Wikipedia®. (2012). *OpenCV*. Consultada el 16 de agosto de 2012, en <http://es.wikipedia.org/wiki/OpenCV>

[38] (2012). *Algoritmo de flujo óptico*. Consultada el 21 de agosto de 2012, en <http://opencvjaveriana.wikispaces.com/file/view/Anexo+4+Algoritmo+De+Flujo+Optico.pdf>

[39] (2010). *Haar Feature-based Cascade Classifier for Object Detection*. Consultada el 22 de agosto de 2012, en [http://opencv.willowgarage.com/documentation/c/objdetect\\_cascade\\_classification.html](http://opencv.willowgarage.com/documentation/c/objdetect_cascade_classification.html)

[40] (2012). *Changing the contrast and brightness of an image!*. Consultada el 22 de agosto de 2012, en

[http://docs.opencv.org/doc/tutorials/core/basic\\_linear\\_transform/basic\\_linear\\_transform.html](http://docs.opencv.org/doc/tutorials/core/basic_linear_transform/basic_linear_transform.html)

# Anexos

**1-Ejemplos de movimiento en diferentes situaciones**

| Ejemplo 1 |           | Ejemplo 2 |           | Ejemplo 3  |           | Ejemplo 4  |           | Ejemplo 5  |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| Módulo    | Ángulo    | Módulo    | Ángulo    | Módulo     | Ángulo    | Módulo     | Ángulo    | Módulo     | Ángulo    |
| 1,000000  | 1,570796  | 1,414214  | 0,785398  | 5,385165   | 0,380506  | 3,162278   | 0,321751  | 3,605551   | 0,982794  |
| 1,414214  | 0,785398  | 1,000000  | 1,570796  | 2,828427   | 0,785398  | 2,236068   | 0,463648  | 4,242641   | 0,785398  |
| 2,236068  | 2,677945  | 3,162278  | 1,249046  | 2,828427   | 0,785398  | 7,810250   | -2,265535 | 4,242641   | 0,785398  |
| 0,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 1,570796  | 3,605551   | 0,588003  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 2,236068  | 2,677945  | 1,414214  | 0,785398  | 2,828427   | 0,785398  | 13,038405  | 0,076772  | 6,082763   | 1,405648  |
| 1,414214  | 2,356194  | 2,236068  | 0,463648  | 2,828427   | 0,785398  | 2,236068   | 0,463648  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 1,570796  | 5,099020   | 0,197396  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,414214  | 0,785398  | 1,414214  | 0,785398  | 3,605551   | 0,588003  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,414214  | 0,785398  | 1,414214  | 0,785398  | 4,123106   | 0,244979  | 3,162278   | 0,321751  | 7,071068   | 0,141897  |
| 1,000000  | 1,570796  | 1,414214  | 0,785398  | 5,385165   | -0,380506 | 27,202941  | 1,272297  | 5,656854   | 0,785398  |
| 0,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 0,000000  | 2,828427   | 0,785398  | 3,162278   | 0,321751  | 6,082763   | 1,405648  |
| 1,414214  | 0,785398  | 1,414214  | 0,785398  | 3,162278   | 0,321751  | 4,123106   | 0,244979  | 1,414214   | 0,785398  |
| 0,000000  | 0,000000  | 2,828427  | 0,785398  | 4,123106   | 0,244979  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 0,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 1,570796  | 4,123106   | 0,244979  | 3,162278   | 0,321751  | 7,071068   | 1,428899  |
| 1,414214  | 0,785398  | 57,314920 | -2,319174 | 4,472136   | 0,463648  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 1,570796  | 3,162278  | -2,819842 | 2,828427   | 0,785398  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 0,000000  | 0,000000  | 2,236068  | 0,463648  | 4,123106   | 0,244979  | 2,236068   | 0,463648  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 1,570796  | 1,000000  | 1,570796  | 5,385165   | 0,380506  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 1,570796  | 1,000000  | 0,000000  | 4,472136   | 0,463648  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 6,324555  | 1,249046  | 1,000000  | 1,570796  | 89,274856  | 3,063103  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 4,338189  | 0,000000  | 70,007142 | 1,556512  | 2,828427   | 0,785398  | 14,000000  | 0,000000  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,414214  | 0,785398  | 20,223748 | 1,421906  | 4,472136   | 0,463648  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,414214  | 0,785398  | 2,828427  | 0,785398  | 5,385165   | 0,380506  | 4,123106   | 0,244979  | 7,615773   | -2,736701 |
| 1,000000  | 1,570796  | 0,000000  | 0,000000  | 3,162278   | 0,321751  | 2,236068   | 0,463648  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 1,570796  | 1,414214  | 0,785398  | 102,181212 | -2,934600 | 7,211103   | -2,158799 | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 0,000000  | 2,236068  | 1,107149  | 7,000000   | 0,000000  | 3,162278   | 0,321751  | 5,000000   | 0,927295  |
| 0,000000  | 0,000000  | 8,246211  | 1,325818  | 6,708204   | 0,463648  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 0,000000  | 1,414214  | 0,785398  | 4,472136   | 0,463648  | 3,605551   | 0,588003  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,414214  | 0,785398  | 7,071068  | 1,428899  | 3,605551   | 0,588003  | 3,162278   | 0,321751  | 5,000000   | 0,643501  |
| 1,414214  | 0,785398  | 1,414214  | 0,785398  | 2,828427   | 0,785398  | 2,236068   | 0,463648  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 0,000000  | 1,414214  | 0,785398  | 2,828427   | 0,785398  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 0,000000  | 1,414214  | 0,785398  | 2,236068   | 0,463648  | 15,000000  | 0,000000  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 1,570796  | 2,236068  | 0,463648  | 4,123106   | 0,244979  | 3,162278   | 0,321751  | 124,807852 | -0,985016 |
| 1,000000  | 1,570796  | 34,000000 | 3,141593  | 2,828427   | 0,785398  | 67,178866  | 2,366720  | 4,242641   | 0,785398  |
| 8,944272  | -0,463648 | 65,764732 | -1,418147 | 2,828427   | 0,785398  | 3,162278   | 0,321751  | 5,000000   | 0,643501  |
| 1,414214  | 0,785398  | 10,770330 | -1,190290 | 4,472136   | 0,463648  | 4,123106   | 0,244979  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 0,000000  | 1,414214  | -2,356194 | 2,236068   | 0,463648  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 8,544004  | 1,929567  | 1,414214  | 0,785398  | 2,000000   | 0,000000  | 5,099020   | 0,197396  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 0,000000  | 1,414214  | 0,785398  | 3,605551   | 0,588003  | 3,605551   | 0,588003  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,414214  | 2,356194  | 1,414214  | 0,785398  | 4,472136   | 0,463648  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 0,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 1,570796  | 5,385165   | 0,380506  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 1,570796  | 1,000000  | 1,570796  | 5,385165   | 0,380506  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 10,440307 | 0,291457  | 1,414214  | 2,356194  | 1,000000   | 1,570796  | 3,162278   | 0,321751  | 4,242641   | 0,785398  |
| 0,000000  | 0,000000  | 2,236068  | 0,463648  | 4,472136   | 0,463648  | 3,162278   | -0,321751 | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 1,570796  | 1,000000  | 1,570796  | 5,385165   | 0,380506  | 242,662317 | -2,967637 | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 1,570796  | 1,414214  | 0,785398  | 18,027756  | 0,339293  | 3,162278   | 0,321751  | 5,385165   | 0,380506  |
| 1,414214  | 0,785398  | 1,000000  | 1,570796  | 5,099020   | 0,197396  | 14,035669  | -0,071307 | 5,000000   | 0,643501  |
| 0,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 4,123106   | 0,244979  | 2,236068   | 0,463648  | 5,000000   | 0,643501  |
| 1,414214  | 0,785398  | 1,000000  | 1,570796  | 4,123106   | 0,244979  | 4,123106   | 0,244979  | 4,242641   | 0,785398  |
| 1,000000  | 1,570796  | 1,000000  | 1,570796  | 10,770330  | -1,190290 | 3,162278   | 0,321751  | 1,000000   | 0,000000  |

Tabla 1: Vehículo circulando normalmente

| Ejemplo 1  |           | Ejemplo 2  |           | Ejemplo 3  |           | Ejemplo 4  |           | Ejemplo 5  |           |
|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| Módulo     | Ángulo    | Módulo     | Ángulo    | Módulo     | Ángulo    | Módulo     | Ángulo    | Módulo     | Ángulo    |
| 1,414214   | 0,785398  | 1,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  | 1,000000   | 0,000000  | 33,241540  | 1,691420  |
| 1,000000   | 0,000000  | 0,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  | 16,763055  | 2,838708  | 41,773197  | 2,948892  |
| 1,414214   | 0,785398  | 0,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  | 3,162278   | 0,321751  | 25,495098  | 2,944197  |
| 1,414214   | 0,785398  | 1,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 0,000000  | 18,973666  | 2,819842  |
| 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 0,000000  | 11,704700  | 2,792822  | 38,832976  | 2,934096  | 39,319207  | 3,014083  |
| 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  | 0,000000   | 0,000000  | 0,000000   | 0,000000  |
| 1,000000   | 1,570796  | 152,266214 | -3,082451 | 11,180340  | 2,677945  | 1,000000   | 0,000000  | 25,179357  | 3,022164  |
| 1,414214   | 0,785398  | 1,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  | 0,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  |
| 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  | 1,000000   | 0,000000  | 2,000000   | 0,000000  |
| 1,414214   | 0,785398  | 58,215118  | 3,055598  | 42,544095  | 1,054566  | 1,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  |
| 1,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796  | 30,265492  | 3,009041  | 1,000000   | 1,570796  |
| 1,414214   | 0,785398  | 1,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  | 37,336309  | 3,007271  | 38,327536  | 3,010765  |
| 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796  | 0,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  |
| 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  | 1,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  |
| 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 0,000000  | 14,317821  | 2,930499  | 1,414214   | 0,785398  | 106,775465 | 1,186812  |
| 1,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 1,570796  |
| 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796  | 40,199502  | 3,041924  | 1,000000   | 1,570796  |
| 1,000000   | 1,570796  | 17,029386  | 3,082837  | 1,000000   | 1,570796  | 49,365980  | 3,019750  | 1,414214   | 0,785398  |
| 1,000000   | 1,570796  | 60,033324  | 3,108272  | 15,132746  | 3,009041  | 0,000000   | 0,000000  | 27,073973  | 3,067654  |
| 367,458841 | -2,823284 | 1,000000   | 0,000000  | 18,248288  | 2,976444  | 49,365980  | 3,019750  | 25,709920  | 1,335251  |
| 1,000000   | 1,570796  | 14,317821  | 2,930499  | 20,099751  | 3,041924  | 20,099751  | 3,041924  | 20,099751  | 3,041924  |
| 85,158675  | 2,976444  | 0,000000   | 0,000000  | 15,132746  | 3,009041  | 1,414214   | 0,785398  | 12,165525  | 2,976444  |
| 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 0,000000  | 19,235384  | 2,984991  | 19,235384  | 2,984991  | 98,954535  | 1,815775  |
| 0,000000   | 0,000000  | 74,953319  | -2,912794 | 15,297059  | 2,944197  | 23,000000  | 1,570796  | 1,414214   | 0,785398  |
| 1,000000   | 1,570796  | 0,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  | 49,162994  | -3,060141 | 1,414214   | 0,785398  |
| 1,000000   | 1,570796  | 0,000000   | 0,000000  | 12,369317  | 2,896614  | 1,000000   | 0,000000  | 22,203603  | 3,006065  |
| 2,236068   | 1,107149  | 14,117365  | -3,091988 | 1,414214   | 0,785398  | 1,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 0,000000  |
| 25,709920  | 2,906048  | 0,000000   | 0,000000  | 14,142136  | 2,999696  | 17,720045  | 2,855541  | 17,720045  | 2,855541  |
| 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796  |
| 1,414214   | 0,785398  | 0,000000   | 0,000000  | 65,459911  | -2,540879 | 98,351411  | 1,902193  | 1,414214   | 0,785398  |
| 1,000000   | 0,000000  | 60,133186  | 3,075024  | 1,000000   | 1,570796  | 86,469648  | 1,466525  | 1,414214   | 0,785398  |
| 1,414214   | 0,785398  | 60,033324  | 3,108272  | 60,033324  | 3,108272  | 148,946299 | 2,542417  | 148,946299 | 2,542417  |
| 1,414214   | 0,785398  | 0,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796  | 37,336309  | 3,007271  | 1,000000   | 1,570796  |
| 1,000000   | 1,570796  | 16,124515  | 3,017238  | 1,414214   | 0,785398  | 0,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  |
| 0,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  | 1,414214   | 0,785398  | 1,000000   | 0,000000  | 25,179357  | 3,022164  |
| 1,000000   | 1,570796  | 0,000000   | 0,000000  | 15,297059  | 2,944197  | 49,648766  | 2,979755  | 1,414214   | 0,785398  |
| 76,157731  | 2,902983  | 0,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 1,570796  | 303,980263 | 2,942907  |
| 1,000000   | 0,000000  | 120,420098 | 2,232568  | 1,000000   | 1,570796  | 50,990195  | 2,944197  | 1,414214   | 0,785398  |
| 21,023796  | 2,013171  | 0,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796  | 167,839209 | 2,717924  | 0,000000   | 0,000000  |
| 1,414214   | 0,785398  | 1,000000   | 0,000000  | 456,080037 | -2,618095 | 42,426407  | 1,428899  | 42,426407  | 1,428899  |
| 1,000000   | 1,570796  | 7,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 1,570796  | 0,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  |
| 223,725278 | -3,061050 | 1,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  | 1,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  |
| 0,000000   | 0,000000  | 16,124515  | 3,017238  | 16,124515  | 3,017238  | 1,000000   | 0,000000  | 18,439089  | -2,922924 |
| 1,000000   | 0,000000  | 0,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796  | 0,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  |
| 1,000000   | 0,000000  | 90,796476  | 3,009041  | 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  |
| 1,414214   | 0,785398  | 0,000000   | 0,000000  | 1,414214   | 0,785398  | 1,000000   | 0,000000  | 46,173586  | 3,054854  |
| 1,000000   | 1,570796  | 0,000000   | 0,000000  | 15,297059  | 2,944197  | 15,297059  | 2,944197  | 41,303753  | 3,020241  |
| 1,000000   | 0,000000  | 193,372697 | -3,079496 | 193,372697 | -3,079496 | 49,162994  | -3,060141 | 29,614186  | 2,937575  |
| 1,414214   | 0,785398  | 1,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796  | 0,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796  |
| 1,000000   | 0,000000  | 0,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796  | 1,000000   | 0,000000  | 1,000000   | 0,000000  |

Tabla 2: Vehículo siendo adelantado

| Ejemplo 1 |           | Ejemplo 2 |           | Ejemplo 3 |           | Ejemplo 4 |           | Ejemplo 5 |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Módulo    | Ángulo    | Módulo    | Ángulo    | Módulo    | Ángulo    | Módulo    | Ángulo    | Módulo    | Ángulo    |
| 5,000000  | 0,000000  | 6,000000  | 0,000000  | 7,071068  | -0,141897 | 12,369317 | -0,244979 | 11,045361 | -0,090660 |
| 3,000000  | 0,000000  | 10,198039 | -0,197396 | 5,000000  | 0,000000  | 16,492423 | -0,244979 | 1,000000  | 1,570796  |
| 6,082763  | -0,165149 | 8,062258  | -0,124355 | 9,219544  | -0,218669 | 7,000000  | 0,000000  | 1,414214  | 0,785398  |
| 6,082763  | -0,165149 | 8,062258  | -0,124355 | 1,414214  | 0,785398  | 17,464249 | -0,231091 | 0,000000  | 0,000000  |
| 5,000000  | 0,000000  | 8,062258  | -0,124355 | 7,071068  | -0,141897 | 1,000000  | 0,000000  | 15,297059 | -0,197396 |
| 6,000000  | 0,000000  | 8,062258  | -0,124355 | 1,000000  | 1,570796  | 13,152946 | -0,152649 | 1,414214  | 0,785398  |
| 6,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 1,570796  | 7,000000  | 0,000000  | 8,062258  | -0,124355 | 27,202941 | -0,298499 |
| 6,000000  | 0,000000  | 8,062258  | -0,124355 | 1,414214  | 0,785398  | 9,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 0,000000  |
| 6,082763  | -0,165149 | 7,071068  | 2,356194  | 8,062258  | -0,124355 | 1,000000  | 1,570796  | 1,000000  | 0,000000  |
| 1,000000  | 0,000000  | 10,198039 | -0,197396 | 5,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 6,000000  | 0,000000  |
| 4,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 1,570796  | 1,414214  | 0,785398  | 13,601471 | 0,298499  | 11,401754 | 0,266252  |
| 1,414214  | -0,785398 | 1,000000  | 0,000000  | 2,000000  | 1,570796  | 1,000000  | 1,570796  | 1,000000  | 1,570796  |
| 0,000000  | 0,000000  | 6,000000  | 0,000000  | 4,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 0,000000  | 7,071068  | -0,141897 |
| 5,000000  | 0,000000  | 82,800966 | 0,922464  | 6,000000  | 0,000000  | 13,038405 | -0,076772 | 7,071068  | -0,141897 |
| 8,062258  | -0,124355 | 8,062258  | -0,124355 | 1,414214  | 0,785398  | 17,117243 | 0,117109  | 7,000000  | 0,000000  |
| 4,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 0,000000  | 4,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 0,000000  |
| 0,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 1,414214  | 0,785398  | 0,000000  | 0,000000  | 12,369317 | -0,244979 |
| 1,414214  | 0,785398  | 8,000000  | 0,000000  | 6,000000  | 0,000000  | 17,262677 | 0,174672  | 10,049876 | -0,099669 |
| 1,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 7,000000  | 0,000000  | 13,038405 | -0,076772 | 8,000000  | 0,000000  |
| 10,049876 | -0,099669 | 8,000000  | 0,000000  | 7,000000  | 0,000000  | 19,416488 | -0,207496 | 7,000000  | 0,000000  |
| 8,246211  | -0,244979 | 6,324555  | 0,321751  | 6,082763  | -0,165149 | 16,000000 | 0,000000  | 10,049876 | -0,099669 |
| 1,000000  | 0,000000  | 29,000000 | 2,331809  | 6,082763  | -0,165149 | 10,049876 | -0,099669 | 1,414214  | 0,785398  |
| 5,099020  | -0,197396 | 12,165525 | -0,165149 | 6,000000  | 0,000000  | 7,000000  | 0,000000  | 1,414214  | 0,785398  |
| 1,414214  | 0,785398  | 7,071068  | -0,141897 | 10,049876 | -0,099669 | 1,000000  | 1,570796  | 7,000000  | 0,000000  |
| 0,000000  | 0,000000  | 6,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 1,570796  | 10,049876 | -0,099669 | 7,000000  | 0,000000  |
| 8,246211  | -0,244979 | 5,099020  | -0,197396 | 9,055385  | -0,110657 | 17,262677 | -0,174672 | 1,414214  | 0,785398  |
| 0,000000  | 0,000000  | 9,055385  | -0,110657 | 5,000000  | 0,000000  | 10,816654 | -0,588003 | 10,049876 | -0,099669 |
| 10,049876 | -0,099669 | 0,000000  | 0,000000  | 1,414214  | 0,785398  | 11,045361 | -0,090660 | 1,000000  | 1,570796  |
| 9,055385  | 0,110657  | 10,198039 | -0,197396 | 9,219544  | -0,218669 | 20,223748 | -0,148890 | 1,414214  | 0,785398  |
| 5,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 1,570796  | 8,000000  | 0,000000  | 10,198039 | -0,197396 |
| 7,071068  | -0,141897 | 11,180340 | -0,179853 | 7,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 0,000000  | 9,486833  | -0,321751 |
| 9,219544  | -0,218669 | 1,000000  | 0,000000  | 10,198039 | -0,197396 | 9,433981  | 1,012197  | 9,219544  | -0,218669 |
| 4,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 1,414214  | 0,785398  | 17,464249 | -0,231091 | 11,000000 | 0,000000  |
| 1,000000  | 0,000000  | 7,000000  | 0,000000  | 1,000000  | 1,570796  | 0,000000  | 0,000000  | 8,062258  | 0,124355  |
| 6,082763  | 0,165149  | 0,000000  | 0,000000  | 1,414214  | 2,356194  | 12,041595 | -0,083141 | 12,369317 | -0,244979 |
| 3,605551  | -0,588003 | 11,180340 | -0,179853 | 5,000000  | 0,000000  | 1,414214  | 0,785398  | 12,165525 | -0,165149 |
| 1,000000  | -1,570796 | 11,045361 | 0,090660  | 1,000000  | 1,570796  | 14,560220 | -2,863293 | 9,055385  | -0,110657 |
| 3,605551  | -0,982794 | 12,165525 | -0,165149 | 1,000000  | 1,570796  | 15,297059 | -0,197396 | 10,049876 | 0,099669  |
| 10,000000 | 0,000000  | 8,062258  | -0,124355 | 6,000000  | 0,000000  | 20,396078 | -0,197396 | 7,280110  | -0,278300 |
| 7,071068  | -0,141897 | 12,165525 | -0,165149 | 10,198039 | -0,197396 | 12,041595 | -0,083141 | 63,253458 | 2,255413  |
| 10,049876 | -0,099669 | 11,180340 | -0,179853 | 1,000000  | 1,570796  | 1,414214  | 0,785398  | 1,414214  | 0,785398  |
| 1,000000  | 1,570796  | 1,000000  | 0,000000  | 2,236068  | 1,107149  | 7,000000  | 0,000000  | 7,000000  | 0,000000  |
| 8,062258  | -0,124355 | 13,341664 | -0,226799 | 8,246211  | -0,244979 | 18,439089 | -0,218669 | 0,000000  | 0,000000  |
| 1,000000  | 0,000000  | 12,165525 | -0,165149 | 1,000000  | 1,570796  | 1,000000  | 0,000000  | 7,000000  | 0,000000  |
| 1,414214  | 0,785398  | 9,219544  | -0,218669 | 0,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 0,000000  | 15,033296 | -0,066568 |
| 7,071068  | -0,141897 | 8,062258  | 0,124355  | 1,000000  | 1,570796  | 10,198039 | 0,197396  | 9,055385  | -0,110657 |
| 1,000000  | -1,570796 | 8,000000  | 0,000000  | 8,062258  | 0,124355  | 1,000000  | 1,570796  | 8,000000  | 0,000000  |
| 9,219544  | -0,218669 | 14,000000 | 0,000000  | 9,219544  | -0,218669 | 15,524175 | -0,260602 | 1,414214  | 0,785398  |
| 7,280110  | -0,278300 | 14,000000 | 0,000000  | 6,082763  | 0,165149  | 1,414214  | 0,785398  | 14,560220 | -0,278300 |
| 5,000000  | 0,000000  | 11,180340 | -0,179853 | 1,414214  | 0,785398  | 1,414214  | 0,785398  | 1,000000  | 1,570796  |

Tabla 3: Vehículo circulando en sentido contrario

| Ejemplo 1 |           | Ejemplo 2  |          | Ejemplo 3 |           | Ejemplo 4 |           | Ejemplo 5 |          |
|-----------|-----------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Módulo    | Ángulo    | Módulo     | Ángulo   | Módulo    | Ángulo    | Módulo    | Ángulo    | Módulo    | Ángulo   |
| 3,605551  | 0,588003  | 5,099020   | 0,785398 | 9,055385  | 0,110657  | 9,055385  | 0,110657  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,605551  | 0,588003  | 4,472136   | 0,463648 | 9,055385  | 0,110657  | 9,055385  | 0,110657  | 7,280110  | 0,278300 |
| 32,062439 | -0,062419 | 1,000000   | 0,000000 | 3,162278  | -1,892547 | 3,162278  | -1,892547 | 7,280110  | 0,278300 |
| 5,385165  | 0,380506  | 4,000000   | 0,000000 | 13,038405 | 0,076772  | 13,038405 | 0,076772  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,605551  | 0,588003  | 8,062258   | 0,785398 | 11,045361 | 0,090660  | 11,045361 | 0,090660  | 9,219544  | 0,218669 |
| 6,403124  | 0,896055  | 16,155494  | 1,570796 | 11,045361 | 0,090660  | 11,045361 | 0,090660  | 8,246211  | 0,244979 |
| 3,605551  | 0,588003  | 4,472136   | 0,463648 | 10,049876 | 0,099669  | 10,049876 | 0,099669  | 8,000000  | 0,000000 |
| 13,000000 | 0,394791  | 4,000000   | 0,000000 | 9,055385  | 0,110657  | 9,055385  | 0,110657  | 8,246211  | 0,244979 |
| 3,605551  | 0,588003  | 5,099020   | 0,785398 | 11,000000 | 0,000000  | 11,000000 | 0,000000  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,605551  | 0,588003  | 7,071068   | 0,000000 | 9,055385  | 0,110657  | 9,055385  | 0,110657  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,605551  | 0,588003  | 8,062258   | 0,785398 | 3,605551  | 0,588003  | 3,605551  | 0,588003  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,605551  | 0,588003  | 7,000000   | 0,000000 | 9,055385  | 0,110657  | 9,055385  | 0,110657  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,605551  | 0,588003  | 8,544004   | 0,463648 | 9,055385  | 0,110657  | 9,055385  | 0,110657  | 10,049876 | 0,099669 |
| 5,099020  | 1,373401  | 6,324555   | 0,785398 | 9,055385  | 0,110657  | 9,055385  | 0,110657  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,605551  | 0,588003  | 7,280110   | 1,570796 | 9,055385  | 0,110657  | 9,055385  | 0,110657  | 8,544004  | 0,358771 |
| 3,605551  | 0,588003  | 149,626201 | 1,249046 | 10,049876 | 0,099669  | 10,049876 | 0,099669  | 10,198039 | 0,197396 |
| 3,605551  | 0,588003  | 6,324555   | 0,785398 | 11,000000 | 0,000000  | 11,000000 | 0,000000  | 8,544004  | 0,358771 |
| 4,472136  | 0,463648  | 4,472136   | 0,463648 | 7,280110  | 0,278300  | 7,280110  | 0,278300  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,605551  | 0,588003  | 4,000000   | 0,000000 | 9,055385  | 0,110657  | 9,055385  | 0,110657  | 8,246211  | 0,244979 |
| 2,828427  | 0,785398  | 6,324555   | 0,463648 | 9,055385  | 0,110657  | 9,055385  | 0,110657  | 8,246211  | 0,244979 |
| 2,828427  | 0,785398  | 7,280110   | 0,463648 | 9,055385  | 0,110657  | 11,180340 | -0,179853 | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,162278  | 0,321751  | 5,099020   | 0,785398 | 9,055385  | 0,110657  | 9,055385  | 0,110657  | 7,615773  | 0,404892 |
| 6,324555  | 0,321751  | 8,062258   | 1,570796 | 10,049876 | 0,099669  | 9,055385  | 0,110657  | 7,280110  | 0,278300 |
| 4,472136  | 0,463648  | 6,082763   | 3,075024 | 9,055385  | 0,110657  | 10,049876 | 0,099669  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,605551  | 0,588003  | 6,082763   | 0,785398 | 42,438190 | 0,601074  | 9,055385  | 0,110657  | 7,280110  | 0,278300 |
| 14,866069 | -2,403778 | 7,280110   | 1,570796 | 10,049876 | 0,099669  | 10,049876 | 0,099669  | 9,486833  | 0,321751 |
| 3,605551  | 0,588003  | 4,472136   | 0,463648 | 9,055385  | 0,110657  | 42,438190 | 0,601074  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,605551  | 0,588003  | 5,385165   | 0,785398 | 10,049876 | 0,099669  | 10,049876 | 0,099669  | 7,615773  | 0,404892 |
| 3,605551  | 0,982794  | 5,000000   | 0,000000 | 9,055385  | 0,110657  | 9,055385  | 0,110657  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,605551  | 0,588003  | 5,000000   | 0,000000 | 3,605551  | 0,588003  | 10,049876 | 0,099669  | 8,246211  | 0,244979 |
| 3,605551  | 0,588003  | 5,000000   | 0,000000 | 10,049876 | 0,099669  | 9,055385  | 0,110657  | 9,848858  | 0,418224 |
| 3,605551  | 0,588003  | 14,000000  | 0,000000 | 3,605551  | 0,982794  | 9,055385  | 0,110657  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,605551  | 0,588003  | 8,062258   | 0,785398 | 9,000000  | 0,000000  | 3,605551  | 0,588003  | 8,246211  | 0,244979 |
| 2,828427  | -0,785398 | 5,000000   | 0,785398 | 9,486833  | 0,321751  | 10,049876 | 0,099669  | 8,062258  | 0,124355 |
| 3,605551  | 0,588003  | 17,000000  | 0,000000 | 9,055385  | 0,110657  | 3,605551  | 0,982794  | 8,246211  | 0,244979 |
| 3,605551  | 0,588003  | 1,414214   | 1,570796 | 40,718546 | -2,001489 | 9,000000  | 0,000000  | 8,544004  | 0,358771 |
| 3,605551  | 0,588003  | 7,071068   | 1,570796 | 10,000000 | 0,000000  | 9,486833  | 0,321751  | 7,615773  | 0,404892 |
| 4,472136  | 0,463648  | 1,414214   | 1,570796 | 35,846897 | 0,401229  | 9,055385  | 0,110657  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,605551  | 0,588003  | 12,727922  | 0,785398 | 10,049876 | 0,099669  | 40,718546 | -2,001489 | 8,544004  | 0,358771 |
| 4,472136  | 0,463648  | 0,000000   | 0,000000 | 11,045361 | 0,090660  | 10,000000 | 0,000000  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,605551  | 0,588003  | 3,605551   | 0,588003 | 9,055385  | 0,110657  | 35,846897 | 0,401229  | 8,246211  | 0,244979 |
| 3,605551  | 0,588003  | 3,605551   | 0,588003 | 9,219544  | 0,218669  | 10,049876 | 0,099669  | 7,280110  | 0,278300 |
| 3,162278  | 0,321751  | 3,605551   | 0,588003 | 10,000000 | 0,000000  | 10,049876 | 0,099669  | 8,246211  | 0,244979 |
| 4,472136  | 0,463648  | 3,605551   | 0,588003 | 29,732137 | 0,343024  | 11,045361 | 0,090660  | 8,544004  | 0,358771 |
| 3,605551  | 0,588003  | 5,830952   | 1,570796 | 9,055385  | 0,110657  | 9,055385  | 0,110657  | 18,110770 | 0,110657 |
| 5,000000  | 0,000000  | 1,414214   | 1,570796 | 10,049876 | 0,099669  | 9,219544  | 0,218669  | 7,615773  | 0,404892 |
| 3,605551  | 0,588003  | 5,385165   | 0,785398 | 11,000000 | 0,000000  | 10,000000 | 0,000000  | 7,280110  | 0,278300 |
| 10,440307 | 0,291457  | 4,472136   | 0,463648 | 9,055385  | 0,110657  | 29,732137 | 0,343024  | 8,246211  | 0,244979 |
| 3,605551  | 0,588003  | 3,605551   | 0,588003 | 10,000000 | 0,000000  | 9,055385  | 0,110657  | 7,280110  | 0,278300 |
| 4,242641  | 0,785398  | 4,472136   | 0,463648 | 9,055385  | 0,110657  | 10,049876 | 0,099669  | 7,071068  | 0,141897 |

Tabla 4: Vehículo girando a la derecha



| Ejemplo 1 |          | Ejemplo 2  |          | Ejemplo 3 |          | Ejemplo 4 |           | Ejemplo 5  |          |
|-----------|----------|------------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|------------|----------|
| Módulo    | Ángulo   | Módulo     | Ángulo   | Módulo    | Ángulo   | Módulo    | Ángulo    | Módulo     | Ángulo   |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 23,409400 | 2,792822 | 9,055385  | 2,819842  | 4,123106   | 2,677945 |
| 5,656854  | 2,356194 | 7,211103   | 2,553590 | 5,000000  | 3,141593 | 9,055385  | -2,502430 | 4,123106   | 2,677945 |
| 5,830952  | 2,601173 | 6,708204   | 2,677945 | 4,472136  | 2,677945 | 3,162278  | -1,071450 | 5,099020   | 2,819842 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 8,062258  | 2,089942 | 13,038405 | 2,819842  | 5,000000   | 3,141593 |
| 5,830952  | 2,601173 | 9,219544   | 2,279423 | 4,472136  | 2,677945 | 11,045361 | 2,553590  | 4,000000   | 3,141593 |
| 1,414214  | 2,356194 | 10,816654  | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 11,045361 | 2,553590  | 4,123106   | 2,896614 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 10,049876 | 2,819842  | 4,472136   | 2,553590 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 9,055385  | 2,819842  | 5,000000   | 3,141593 |
| 2,000000  | 1,570796 | 7,211103   | 2,553590 | 5,830952  | 2,601173 | 11,000000 | 2,356194  | 1,000000   | 1,570796 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 9,055385  | 2,819842  | 8,000000   | 1,570796 |
| 5,385165  | 1,951303 | 3,162278   | 1,892547 | 5,385165  | 2,761086 | 3,605551  | 2,553590  | 7,000000   | 1,570796 |
| 5,830952  | 2,601173 | 276,812211 | 2,564612 | 5,385165  | 2,761086 | 9,055385  | 2,819842  | 5,000000   | 3,141593 |
| 5,830952  | 2,601173 | 5,830952   | 2,111216 | 4,472136  | 2,677945 | 9,055385  | 2,944197  | 6,082763   | 2,944197 |
| 5,000000  | 2,498092 | 8,062258   | 2,622447 | 4,472136  | 2,677945 | 9,055385  | 2,819842  | 1,414214   | 0,785398 |
| 5,830952  | 2,601173 | 6,708204   | 2,677945 | 3,162278  | 1,892547 | 9,055385  | -2,944197 | 1,000000   | 3,141593 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 10,630146 | 2,289626 | 10,049876 | 2,819842  | 6,324555   | 2,819842 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 11,000000 | 2,896614  | 9,055385   | 2,976444 |
| 5,830952  | 2,601173 | 6,324555   | 1,892547 | 5,385165  | 2,761086 | 7,280110  | 2,896614  | 8,062258   | 0,493530 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 9,055385  | 2,819842  | 8,544004   | 3,030935 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 5,385165  | 2,761086 | 9,055385  | 2,819842  | 16,031220  | 2,677945 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 9,055385  | 2,819842  | 6,324555   | 2,976444 |
| 3,605551  | 2,158799 | 8,602325   | 2,191046 | 5,385165  | 2,761086 | 9,055385  | 2,976444  | 5,099020   | 0,785398 |
| 5,830952  | 2,601173 | 8,062258   | 2,622447 | 4,472136  | 2,677945 | 10,049876 | 2,896614  | 6,082763   | 2,896614 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 9,055385  | 2,819842  | 1,414214   | 0,785398 |
| 5,830952  | 2,601173 | 6,708204   | 2,677945 | 3,605551  | 2,553590 | 42,438190 | 3,141593  | 7,280110   | 2,819842 |
| 5,830952  | 2,601173 | 8,062258   | 2,622447 | 2,828427  | 2,356194 | 10,049876 | 2,896614  | 133,869339 | 2,819842 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 5,385165  | 2,761086 | 9,055385  | 2,819842  | 18,357560  | 2,944197 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 5,385165  | 2,761086 | 10,049876 | 2,553590  | 7,280110   | 2,677945 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 9,055385  | -2,944197 | 5,000000   | 0,000000 |
| 7,810250  | 2,265535 | 7,211103   | 2,553590 | 2,000000  | 1,570796 | 3,605551  | 2,896614  | 1,000000   | 0,000000 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 5,830952  | 2,111216 | 10,049876 | 2,896614  | 8,246211   | 2,677945 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 3,605551  | 2,896614  | 5,830952   | 2,553590 |
| 3,162278  | 1,249046 | 7,211103   | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 9,000000  | 0,000000  | 7,071068   | 2,896614 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 5,385165  | 2,761086 | 9,486833  | 2,976444  | 6,000000   | 0,000000 |
| 5,830952  | 2,601173 | 6,708204   | 2,677945 | 5,385165  | 2,761086 | 9,055385  | 2,819842  | 5,385165   | 2,553590 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 2,828427  | 2,356194 | 40,718546 | 2,553590  | 1,000000   | 3,141593 |
| 7,810250  | 2,265535 | 7,211103   | 2,553590 | 5,385165  | 2,761086 | 10,000000 | 0,000000  | 4,000000   | 3,141593 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 5,385165  | 2,761086 | 35,846897 | 2,553590  | 5,000000   | 3,141593 |
| 5,830952  | 2,601173 | 8,062258   | 2,622447 | 5,385165  | 2,761086 | 10,049876 | 2,976444  | 8,062258   | 1,892547 |
| 5,830952  | 2,601173 | 6,708204   | 2,677945 | 5,385165  | 2,761086 | 11,045361 | 2,761086  | 8,246211   | 0,785398 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 9,055385  | 2,896614  | 8,246211   | 0,785398 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 9,219544  | 2,553590  | 2,000000   | 0,000000 |
| 5,830952  | 2,601173 | 8,062258   | 2,622447 | 4,472136  | 2,677945 | 10,000000 | 0,000000  | 1,000000   | 1,570796 |
| 5,830952  | 2,601173 | 414,450238 | 2,927634 | 5,385165  | 2,761086 | 29,732137 | 2,553590  | 1,000000   | 1,570796 |
| 5,830952  | 2,601173 | 4,242641   | 2,356194 | 5,385165  | 2,761086 | 9,055385  | 2,553590  | 5,000000   | 1,570796 |
| 3,605551  | 2,158799 | 10,816654  | 2,553590 | 5,385165  | 2,761086 | 10,049876 | 2,896614  | 1,000000   | 0,000000 |
| 8,062258  | 2,089942 | 7,211103   | 2,553590 | 3,605551  | 2,553590 | 11,000000 | 0,000000  | 5,385165   | 1,570796 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 9,055385  | 2,819842  | 1,000000   | 1,570796 |
| 5,830952  | 2,601173 | 7,211103   | 2,553590 | 4,472136  | 2,677945 | 10,000000 | 2,976444  | 0,000000   | 0,000000 |
| 5,830952  | 2,601173 | 32,557641  | 1,385448 | 3,605551  | 2,158799 | 9,055385  | 2,819842  | 1,000000   | 1,570796 |

Tabla 5: Vehículo girando a la izquierda

